

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra aplikované mechaniky

Planární lokalizace zdrojů akustické emise

Planar Localization of Acoustic Emission Sources

Student:	Paweł Zawada
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Michal Šofer, Ph.D.

Ostrava 2018

Zadání bakalářské práce

Student: **Paweł Zawada**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **3901R003 Aplikovaná mechanika**
Téma: **Planární lokalizace zdrojů akustické emise**
Planar Localization of Acoustic Emission Sources
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte úvod do problematiky akustické emise, šíření elastických vln a lokalizace zdrojů akustické emise.
2. Vybraný lokalizační algoritmus zpracujte do programové podoby. V návaznosti na normu ČSN EN 14584 bude navržený program schopen z předem zadané útlumové křivky určit reálnou amplitudu zdroje v dBAE.
3. Na dostupném zařízení pro akustickou emisi a s využitím vhodné geometrie proveďte ověření Vámi navrženého programu.

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Grosse, U. Ch.; Ohtsu, M.: Acoustic emission testing, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, ISBN: 978-3-540-69895-1
2. Technical Review: Acoustic emission source location, Bruel&Kjaer, No. 2, 1981, ISSN: 0007-2621
3. Beattie, A. G.: Acoustic Emission Non-Destructive Testing of Structures using Source Location Techniques, Sandia Report (SAND2013-7779), Sandia National Laboratories, 2013
4. ČSN EN 14584: Nedestruktivní zkoušení - Akustická emise - Zkoušení kovových tlakových zařízení během přejímací zkoušky - Planární lokalizace zdrojů akustické emise

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Šofer, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


Ing. Martin Fusek, Ph.D.
vedoucí katedry

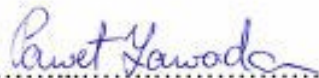



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. května 2018


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2018



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Paweł Zawada

Adresa trvalého pobytu autora práce: Třinec, Růžová 602

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ZAWADA, P. *Planární lokalizace zdrojů akustické emise: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2018, 35 s. Vedoucí práce: Šofer, M.

Bakalářská práce se zabývá problematikou lokalizace zdrojů akustické emise (AE). V první části práce jsou sepsány dosavadní známé fakta týkající se problematiky AE. Je vysvětlen proces generování a šíření ultrazvukových vln a dále jejich snímání a zpracování. V druhé části práce je stanoven lokalizační algoritmus, který je následně zpracován do programové podoby. Do vytvořeného programu je přidána funkce, která na základě normy ČSN EN 14584 určuje reálnou amplitudu zdroje. Poslední část práce popisuje experiment, který ověřuje funkčnost vytvořeného programu v praxi.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

ZAWADA, P. *Planar Localization of Acoustic Emission Sources: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2018, 35 s. Thesis head: Šofer, M.

Bachelor thesis deals with problematic of localization of acoustic emission (AE) sources. In the first part of thesis are written today's known facts concerning AE issues. There is explained process of generation and propagation of ultrasonic waves and then their capture and processing. In second part of thesis is set localization algorithm, which is then processed to program form. A function is added to the created program, which determines the real amplitude of the source according to ČSN EN 14584 standard. The last part describes an experiment that verifies the functionality of the program in practice.

	strana
Seznam použitých znaků a symbolů	7
1. Úvod	8
2. Současný stav řešené problematiky	9
2.1.Princip akustické emise	9
2.2.Zkoušení pomocí metody AE	10
2.3.Historie	10
2.4.Zdroje AE	11
2.5.Pen-Test	12
2.6.Událost akustické emise	12
2.7.Vlny	14
2.8.Kaiserův jev	16
2.9.Felicity jev	16
2.10. AE v prodlevách zatížení	17
2.11. Popis signálu AE základní parametry	18
2.12. Lokalizace zdroje AE	19
2.13. Detekce AE	21
2.13.1. Snímače	21
2.13.2. Piezoelektrický snímač	21
2.13.3. Kalibrace	22
2.13.4. Měřicí trasa	22
2.13.5. Vyhodnocení signálu AE	23
3. Stanovení cíle práce	23
4. Tvorba lokalizačního programu	24
4.1. Princip fungování lokalizačního algoritmu	24
4.2. Korekce maximální amplitudy se vzdáleností	32
5. Ověření programu experimentem	34
5.1. Měřicí sestava	34
5.2. Zjišťování útlumové křivky	37
5.3. Měření rychlosti elastické vlny	37
5.4. Lokalizace zdrojů dosažené výsledky	39
6. Závěr	42
Seznam použité literatury	44
Seznam obrázků	45
Seznam tabulek	46

Seznam použitých znaků a symbolů

20e – vzdálenost dvacetinásobku tloušťky stěny

A002 - změřená maximální amplituda zdroj ve vzdálenosti 0,02 metru od zdroje

A20e – maximální amplituda zdroje ve vzdálenosti 20e

Ac – na vzdálenosti korigovaná maximální amplituda zdroje

Admax – maximální amplituda zdroje ve vzdálenosti dmax

ΔA - útlum

AE – akustická emise

Am – maximální amplituda zdroje v místě měření

d – vzdálenost mezi zdrojem a vybraným místem měření

dB – decibel

dmax – volitelná vzdálenost větší než 20e [mm], v těchto místech je třeba změřit maximální amplitudu zdroje

e – tloušťka tělesa

kHz – kilohertz

MHz – megahertz

mm – milimetr

mV – milivolt

t1 je rozdíl času mezi příchodem vlny k prvnímu a druhému snímači

t2 je rozdíl času mezi příchodem vlny k prvnímu a třetímu snímači

μs – mikrosekunda

v - rychlost šíření vlny.

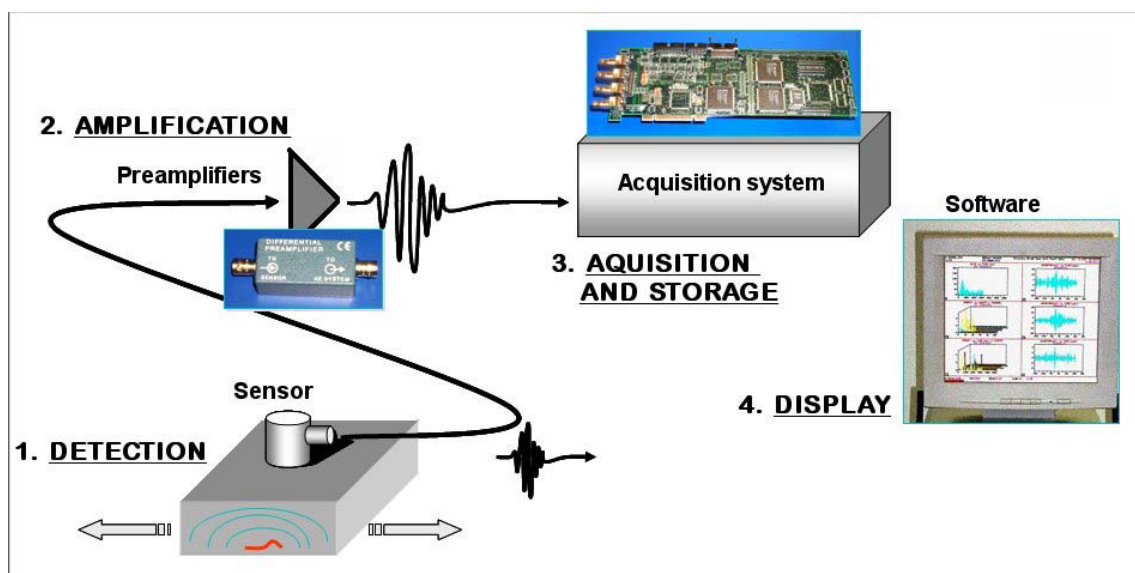
1. Úvod

V dnešních dobách se technické obory rozvíjejí víc než kdy předtím. Technika a technologie jdou dopředu mílovými kroky. Pokud chce nějaká firma uspět a udržet se mezi ostatními firmami, musí být konkurence schopná. Její provoz musí být efektivní jak z hlediska ekonomického tak i časového a přitom její produkty musí být dostatečně kvalitní. Proto se firmy a podniky uklánějí k nejnovějším technologiím, které šetří čas i peníze. Mezi ně se řadí i technologie lokalizace akustické emise. Může najít uplatnění v mnoha oborech. V laboratorních podmínkách při testování výdrže tlakových nádob z alternativních materiálů, jako je uhlíkové vlákno. Používá se v průmyslu, který využívá tlakové nádoby, dopravní potrubí nebo různé typy zásobníků. Materiál degraduje, spoje s časem přestávají těsnit, někdy může dojít k přetížení. Pokud je nainstalován systém lokalizace zdrojů akustické emise s online monitorováním, může díky včasným varováním o rozvíjející se trhlině nebo úniku média, předejít katastrofickým nehodám nebo dokonce lidským obětem. S tímto systémem se lze setkat i při testování statiky velkých konstrukcí, jako jsou mosty a průmyslové haly. Lokalizace zdroje akustické emise je možná díky snímačům, které jsou připevněny na povrch zkoumaného tělesa. Pro plošnou lokalizaci zdroje jsou potřebné nejméně tři snímače. Počítač se speciálním softwarem zpracovává vše, co snímače zachytí. V homogenním a izotropním materiálu se ultrazvuková vlna šíří konstantní rychlostí. Jelikož vzdálenost mezi aktivním zdrojem a jednotlivým snímačem je vesměs rozdílná, dorazí vlna do snímačů s různým časovým zpožděním. Tyto časové rozdíly příchodů vlny se můžou převést na rozdíly vzdáleností, které jsou pro výpočet souřadnic zdroje klíčové. Body ležící na hyperbole mají vždy stejný rozdíl vzdáleností od ohnisek. Právě mezi dvěma snímači lze vytvořit hyperbolu, na které leží zdroj. Použitím více hyperbol s více snímačů se získá jediný bod, na kterém může ležet zdroj.

2. Současný stav řešení problematiky

2.1. Princip akustické emise

Akustická emise je nauka zabývající se vznikem a šířením elastické napěťové vlny v materiálu. Když je materiál zatěžován, například když je stlačován, je dodávána energie. Dynamické změny, vyvolané silovými účinky, akumulovanou energii z materiálu uvolňují v různé podobě. Energie může být uvolněna do okolí například v podobě tepelného záření nebo právě napěťovou vlnou, která se šíří celým tělesem uvnitř i na povrchu. Existuje několik typů vln, z toho každá se šíří jiným způsobem, jinou rychlostí a tím pádem dává různou vypovídající hodnotu týkající se procesů probíhajících ve struktuře materiálu. Tyto vlny jsou následně detekovány senzory, převedeny na elektrický signál, následně je signál zesílen, zpracován a zobrazen pomocí měřicího softwaru. Tento postup je využíván pro nedestruktivní zkoušení materiálu.



Obr. 2.1 Princip AE [7]

2.2 Zkoušení pomocí metody AE

Metoda AE je metodou pasivní, to znamená, že nepoužívá aktivní členy, které by působily na materiál. Těleso ovšem musí být vystaveno zátěžným silám, aby došlo k emisi. Následně při zkoušení daného tělesa se pouze zaznamenává reakce materiálu na aplikované zatížení. V praxi tak může být nějaká součást neustále monitorována a případná rostoucí trhlina včas rozpoznána. Včasným zakročením a učiněním patřičných kroků, lze zamezit velkým škodám. S použitím několika snímačů a správných přístrojů, je možné následně takovou trhlinu lokalizovat. Nevýhoda je, že tato metoda není úplně stoprocentní. Snímače jsou totiž velmi citlivá zařízení a kromě signálu z trhliny registrují velké množství rušících signálů z okolí. Měřicí technik tak nemusí vždy přesně z ovlivněného výstupního signálu přesně určit aktuální situaci. Druhou nevýhodou je, že děje probíhající v materiálu nejsou opakovatelné. Pokud zatěžíme těleso a zachytíme signál od tvořící se trhliny, tak při opakovaném zatížení bude signál jiný.

2.3 Historie

Lidé se od nepaměti setkávali s AE a to skoro denně, například při praskání dřeva nebo skály, kdy je slyšet charakteristický zvuk. Tento jev byl v už v dávných dobách využíván horníky jako signalizátor nebezpečí. Pokud hornina nebo podpůrné nosníky začaly „sténat“, věděli, že zde hrozí nebezpečí závalu. Jev akustické emise slyšitelný při ohýbání cínové tyče, je známý od počátku produkce tohoto kovu. Jedním z prvních vědců, který využíval AE pro výzkum, byl Charles Sanborn Barrett, který zkoumal fázový přechod při nízkých teplotách v lithium-hořčíkových slitinách. Magnetofonovou jehlou nahrával signály vycházející ze slitiny při měnících se teplotách. Za průkopníka v oblasti využití metody akustické emise se považuje německý fyzik Joseph Kaiser. V 50. letech a 60. letech 20. století působil na Technické Univerzitě v Mnichově, kde svou výzkumnou prací položil základy dnes používané metodě nedestruktivního zkoušení pomocí AE. Dlouhé roky se diskutovalo na téma správnosti pojmu „akustická emise“, neboť slovo „akustická“ evokuje zvukovou vlnu, která je slyšitelná lidským uchem. Popravdě elastická vlna generována v materiálu má velmi široké frekvenční spektrum od 50 kHz až několik MHz. Nicméně tato terminologie se v technické praxi udržela a používá se pro označení emise ultrazvukových elastických vln, které jsou generovány zdrojem AE uvnitř materiálu.

2.4 Zdroje AE

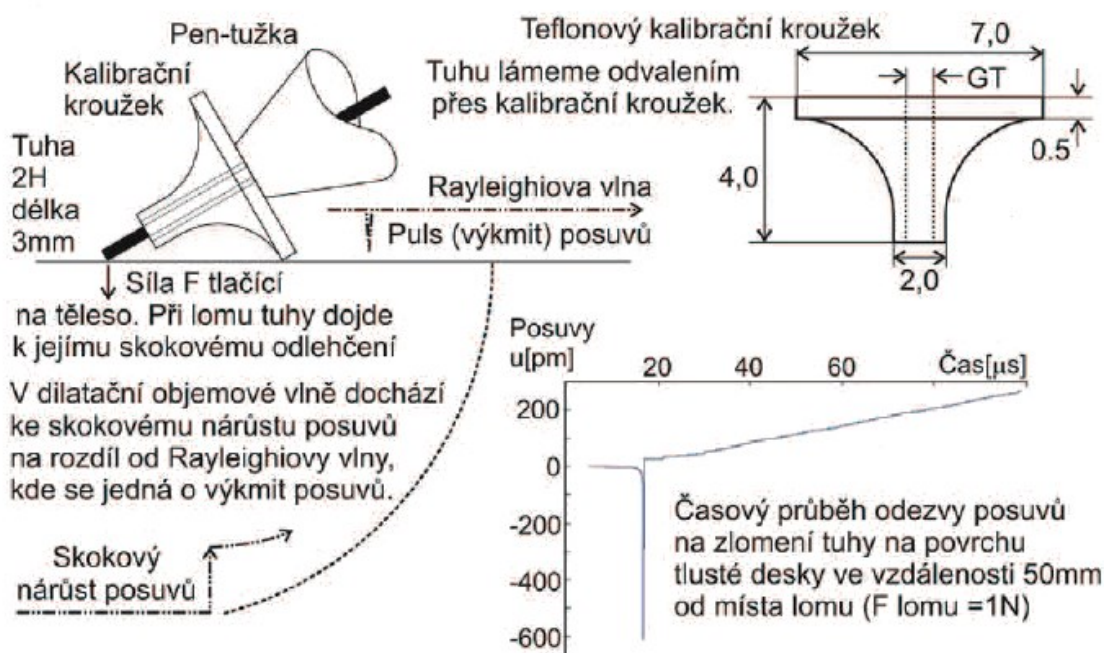
Elastická vlna se vytváří díky rapidní změně rozložení napětí v materiálu. Tato změna je obvykle vyvolána vnějším zatížením. Vznik a šíření vln je možné pozorovat v pevných tělesech, v tekutinách, v plynech nebo i v plazmě. Vnější zatížení nemusí být jenom mechanické, může být i teplotní nebo magnetické. Změna napětí musí být dostatečně rychlá, aby měla dostatek energie pro předání do okolního materiálu a aby se v něm rozptýlila jako elastická vlna. Obecně v makroskopickém měřítku se jedná především o zemětřesení, hřmění vyvolané bleskem nebo i únik média z tlakové nádoby nebo dopravního potrubí. Zato do mikroskopického měřítku se v případě kovových materiálů započítává vznik a šíření trhliny, lom, dislokační pohyby, plastická deformace, vnitřní tření materiálu, fázové přeměny, atd. Nejméně energie vysílají dislokační pohyby. Pokud je shluk dislokací dostatečně silný, lze detekovat dislokace v řádu až 10^{-14} m. Fázové přeměny, jako například martenzitická přeměna uhlíkových ocelí, generují silnější signál, neboť se odehrávají prakticky v celém objemu materiálu. Nejlepší a nejsilnější signál dávají trhlinové útvary. V trhlíně jednak vystupuje tření, protože se o sebe vzájemně třou plochy, které trhlina vytvořila, a ještě je v oblasti kořene trhliny lokální napětí překračující mez kluzu, takže je zde přítomna plastická deformace. Existují další zdroje, které se používají pro umělé vyvolání AE a to především v laboratorních podmínkách, případně pro kalibraci snímačů. Nejznámější a nejčastěji používané je pomocí lomu kapiláry, klepnutí tyče na povrch tělesa nebo tzv. Pen-Test. Velikost amplitudy je ovlivněna mnoha okolnostmi. Tabulka zobrazena níže, ukazuje vybrané parametry, které vyvolávají nízké nebo vysoké amplitudy.

Parametry vyvolávající nízké amplitudy	Parametry vyvolávající vysoké amplitudy
Nízká mez kluzu	Vysoká mez kluzu
Vysoká tažnost	Nízká tažnost
Vysoká teplota	Nízká teplota
Anizotropní materiál	Izotropní materiál
Malá velikost zrna	Velká velikost zrna
Homogenní materiál	Nehomogenní materiál
Rovinná napjatost	Trojosá napjatost
Tvářený materiál	Odlévaný materiál

Tab. 2.1 Vliv parametrů na velikost amplitudy

2.5 Pen-Test

Pen-Test je taky často nazýván jako Hsu-Nielsenův zdroj AE. Je v praxi hojně využíván pro svoji jednoduchost, rychlost a dostupnost. Jelikož je tento zdroj normovaný, při opakovaných aplikacích se generují prakticky stejné vlny a díky tomu jej lze velmi dobře využít pro kalibraci snímačů. Princip spočívá v přiložení tužky se speciálním kalibračním kroužkem k povrchu a zlomení 3 mm dlouhé tuhy o povrch tělesa. Tato tužka zajišťuje pokaždé stejné zlomení tuhy. Tuha tlačí na materiál a při zlomení se povrch skokově odlehčí. Tím pádem se uvolní relativně velké množství energie ve velké míře ve formě AE. Výhodou je, že se tímto generuje rovnoměrně rozložené široko frekvenční spektrum vln. Pro Pen-Test se používají tuhy tvrdosti 2H většinou s tloušťkou 0,3 mm nebo 0,5 mm.



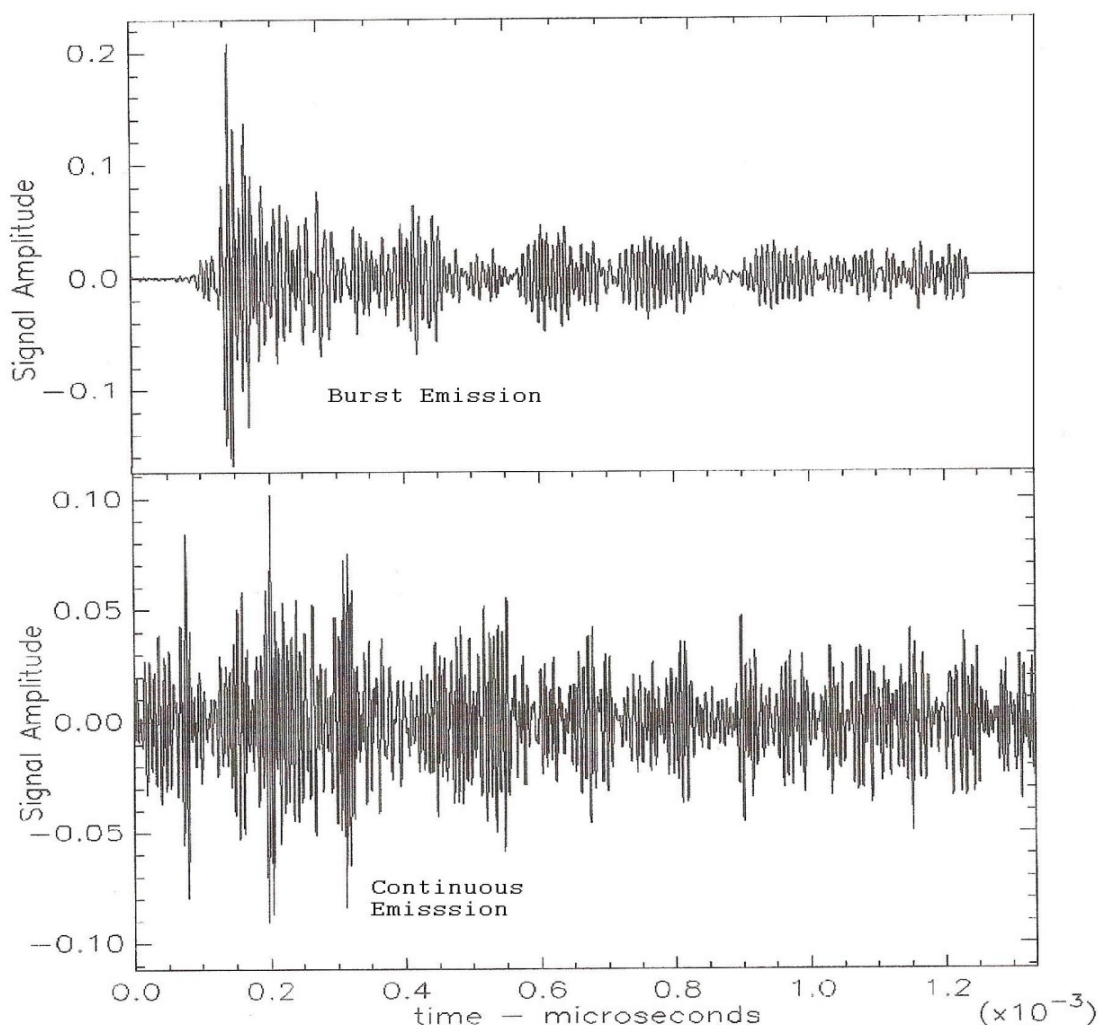
Obr. 2.2 Pen test [10]

2.6 Událost akustické emise

Tímto termínem označuje norma ČSN EN 1330-9 fyzikální jev, který způsobuje akustickou emisi. Konkrétní jevy jsou popsány v kapitole Zdroje AE. Rozlišují se dva případy události AE. Jestliže je možné jasně rozlišit jednu nebo více událostí, pak se jedná o nespojitou, nebo taky praskavou akustickou emisi. Jedna událost AE se nazývá hit. Průběh zobrazený v horní části grafu je typický pro rozvíjející se trhlinu. Je vidět

výrazná a poměrně velká amplituda a dále značný útlum kmitání. Při zkoušení se technik zaměřuje především na dobu trvání události, maximální hodnotu signálu, počet událostí ve zvoleném časovém intervalu, počet překmitů přes vybraný prahový limit, dobu náběhu signálu.

Druhý typ AE se nazývá spojitá AE a nastává tehdy, kdy jednotlivé události nelze od sebe jednoznačně odlišit. Elastické vlny jsou generovány v materiálu na mnoha místech a jak se šíří, tak se navzájem ovlivňují, překrývají se a sčítají. Charakteristický průběh je zobrazen v dolní části grafu. Spojitá AE je typická pro plastickou deformaci, kavitaci nebo únik média pod tlakem trhlinou nebo netěsností v potrubí nebo tlakové láhvi. U tohoto signálu se vyhodnocuje střední, efektivní a maximální hodnotu, energii události, počet překmitů přes prahovou hodnotu, amplitudové a frekvenční spektrum.

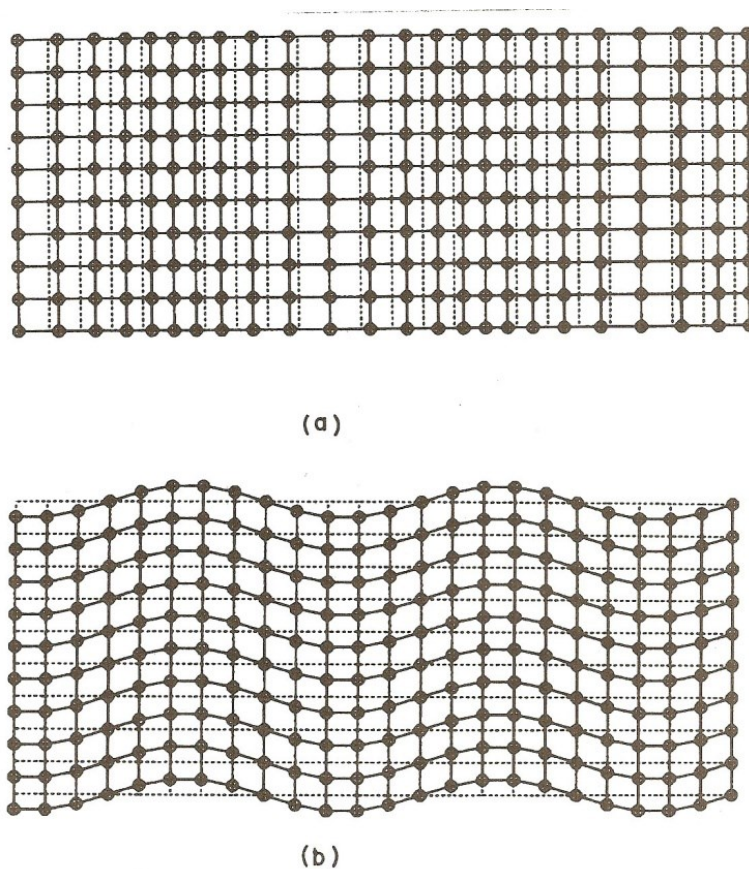


Obr. 2.3 Nespojité a spojitá emise [4]

2.7 Vlny

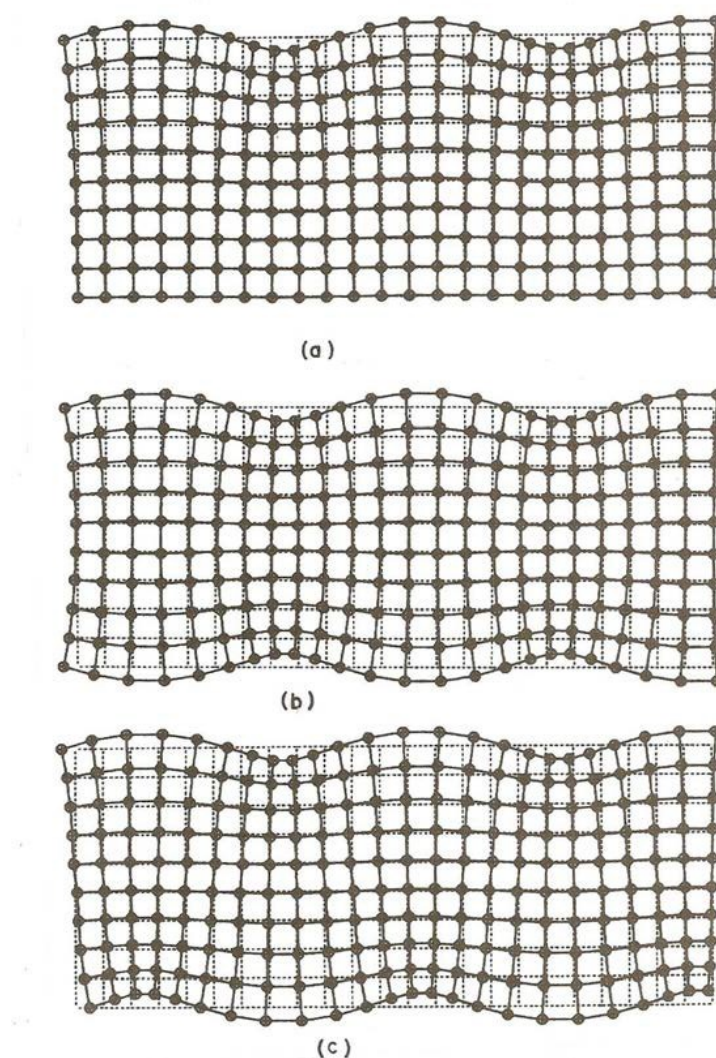
Zjednodušeně si lze materiál představit jako síť atomů, které jsou spolu svázány, ale vazby jim dovolují, v určitém rozmezí, vzájemný pohyb. Vlny se tak šíří relativním pohybem atomů. Rozlišujeme dvě základní vlny. Existuje vlna podélná Obr. (a) a příčná Obr. (b). Podélné, nebo taky longitudinální, vlny se mohou šířit v pevných, kapalných i plynných prostředích. Části kmitají ve směru šíření vlny, takže dochází lokálně k zhušťování a zředňování materiálu. Rychlost propagace vlny je závislá na elastických vlastnostech materiálu, takže záleží na modulu pružnosti v tahu, Poissonově čísle a měrné hmotnosti prostředí.

Příčné vlny se šíří pouze v materiálech, které mohou přenášet smykové zatížení. Částice kmitají ve směru kolmém na směr šíření vlny. Jelikož se způsoby šíření vln liší, liší se rovněž i rychlosti jejich šíření. Rychlost podélné vlny bývá zpravidla větší a rychlost příčné vlny je většinou o málo větší než polovina rychlosti podélné vlny. Je závislá na modulu pružnosti ve smyku a měrné hmotnosti prostředí.



Obr. 2.4 Podélné a příčné vlny [4]

Z důvodu nerovnoměrnosti sil mezi atomy na povrchu tělesa se generují další typy vln. Na obrázku a) je zobrazena Rayleighova vlna, šířící se po povrchu tělesa. Je tvořena kombinací podélné a příčné vlny. Částice se pohybují v eliptickém pohybu. Rychlost šíření je o něco menší než rychlost příčné vlny. Vlna zasahuje částice do hloubky jedné vlnové délky. V tenkých deskách, které mají tloušťku několik vlnových délek se šíří Lambovy vlny. Tyto vlny se šíří v celé tloušťce materiálu. Na obrázku b) je zobrazena Lambova vlna symetrická. Tenká deska se smršťuje ve směru kolmém na směr šíření vlny. Druhá varianta Lambovy vlny, zvaná antisymetrická, je zobrazena na obrázku c). O tom jakým způsobem se bude Lambova vlna šířit, rozhoduje tloušťka materiálu, frekvence vlny a poloha zdroje.

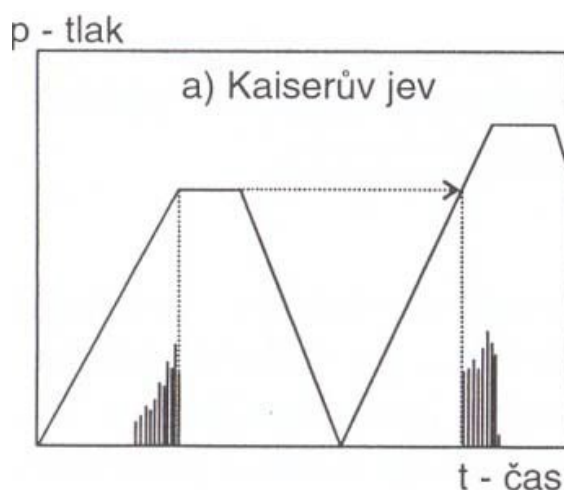


Obr. 2.5 Rayleighovy a Lambovy vlny [4]

Podélné, příčné, Rayleighovy a Lambovy vlny jsou základní a nejdůležitější vlny, se kterými se lze setkat v oblasti AE. Zdaleka však nejsou jediné, které se můžou v pevných tělesech objevit. Pro potřeby této práce však není nezbytné další typy vln zmiňovat.

2.8 Kaiserův jev

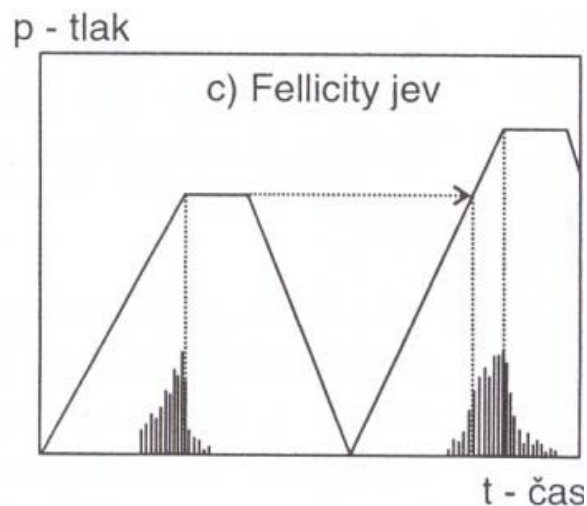
Joseph Kaiser publikoval v roce 1950 práci, ve které popisuje nevratnost procesů probíhajících v zatěžovaném materiálu. Při zátěži větší než je mez kluzu, v materiálu vzniká plastická deformace. Tato deformace je zdrojem elastických vln, které je možné snímat. Po odlehčení emise vln ustane. Při opětovném zatěžování jsou vlny generovány až po překročení předchozího maximálního zatížení.



Obr. 2.6 Kaiserův jev [6]

2.9 Felicity jev

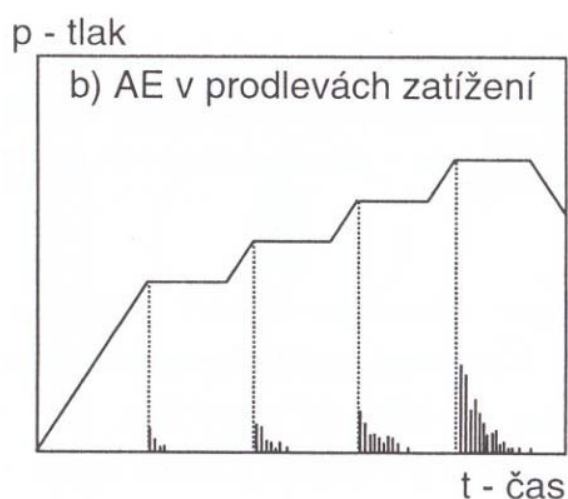
Kaiserův jev neplatí obecně pro všechny materiály. Při studování kompozitních materiálů se přišlo na to, že v materiálu se generuje AE už před překročením maxima předchozího zatížení. Tedy elastické vlny se objevují znovu při podobném zatížení, byť s menší energií.



Obr. 2.7 Felicity jev [6]

2.10 AE v prodlevách zatížení

Pokud nárůst zatížení v čase je rychlejší než schopnost materiálu relaxovat napětí, dochází při zastavení zatěžování a setrvání na dané úrovni k pokračování plastické deformace, tzv. plastické tečení materiálu. Generování a dozívání AE signalizuje přítomnost významných koncentrátorů napětí. Pokus s časem dochází k velmi pomalému dozívání AE, znamená to, že materiál má malou schopnost relaxovat. Existují speciální případy, kdy v prodlevě zatížení dochází k nárůstu AE a to značí, že materiál nedokáže zastavit plastickou deformaci a je nestabilní. Takový případ je velmi nebezpečný a může dojít s časem k přetržení.

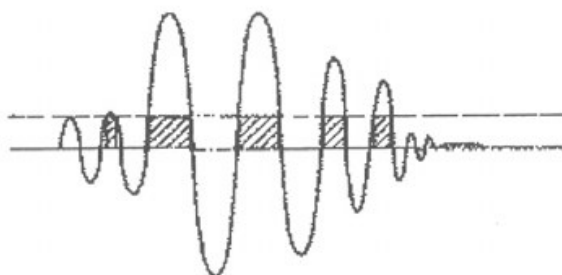


Obr. 2.8 AE v prodlevách zatížení [6]

2.11 Popis signálu AE základní parametry

Parametry signálu AE budou popsány na jednom hitu. Hit je nespojitý signál AE, který je jasně rozlišitelný a charakterizuje se časově ohraničeným dějem, kdy signál překročí určitý práh, strmě roste do špičky a následně se vytrácí a signál se vrací opět pod daný práh. Parametry popisující událost:

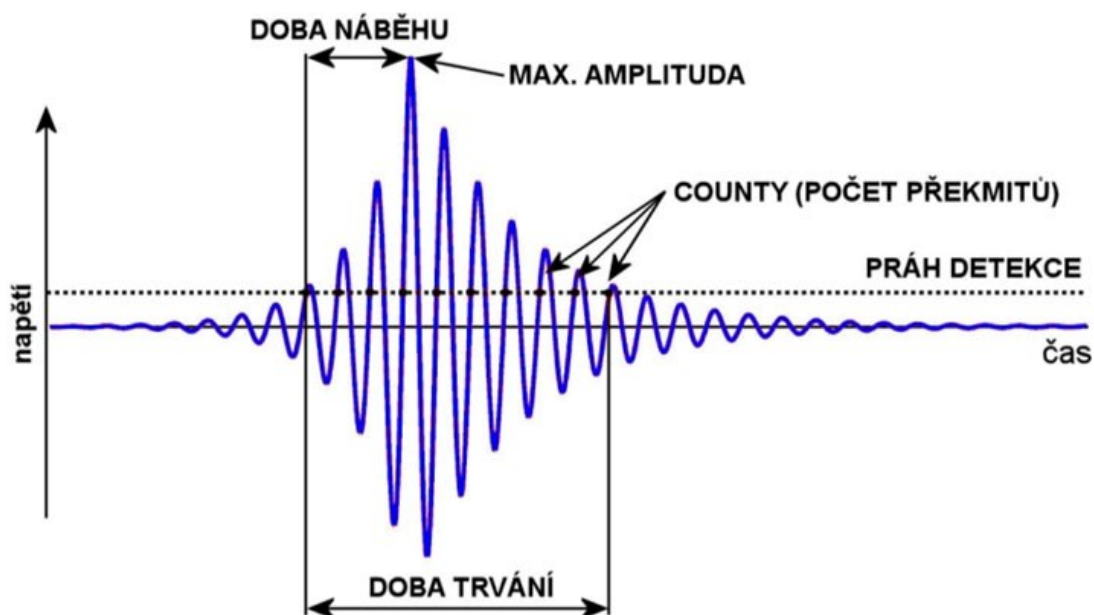
- Threshold - práh detekce je minimální velikost amplitudy, která musí překročena, aby nespojitý signál mohl být detekován. Stanovuje se individuálně pro potřeby konkrétní aplikace.
- Counts – počet všech překmitů přes prahovou hodnotu za čas trvání hitu,
- Rise counts - počet překmitů, počítaný od prvního překmitu přes prahovou hodnotu po maximální amplitudu,
- Ringdown counts – počet překmitů, počítaný od maximální amplitudy do podkročení prahu,
- Hit duration – čas trvání hitu, doba mezi prvním překročením a podkročením prahu,
- Rise time – doba náběhu je doba mezi prvním překročením a maximem amplitudy,
- Ringdown time – doba počítána od maxima amplitudy po podkročení prahu,
- Peak amplitude – maximální výchylka zachycena za dobu hitu,
- Průměrná frekvence události – je definována počtem překmitů v čase,
- Energie hitu je rovna integraci v čase plochy pod obálkou emisní události,



Obr. 2.9 Energie události [8]

- Mrtvý čas – doba mezi hity, kdy není překročen práh.

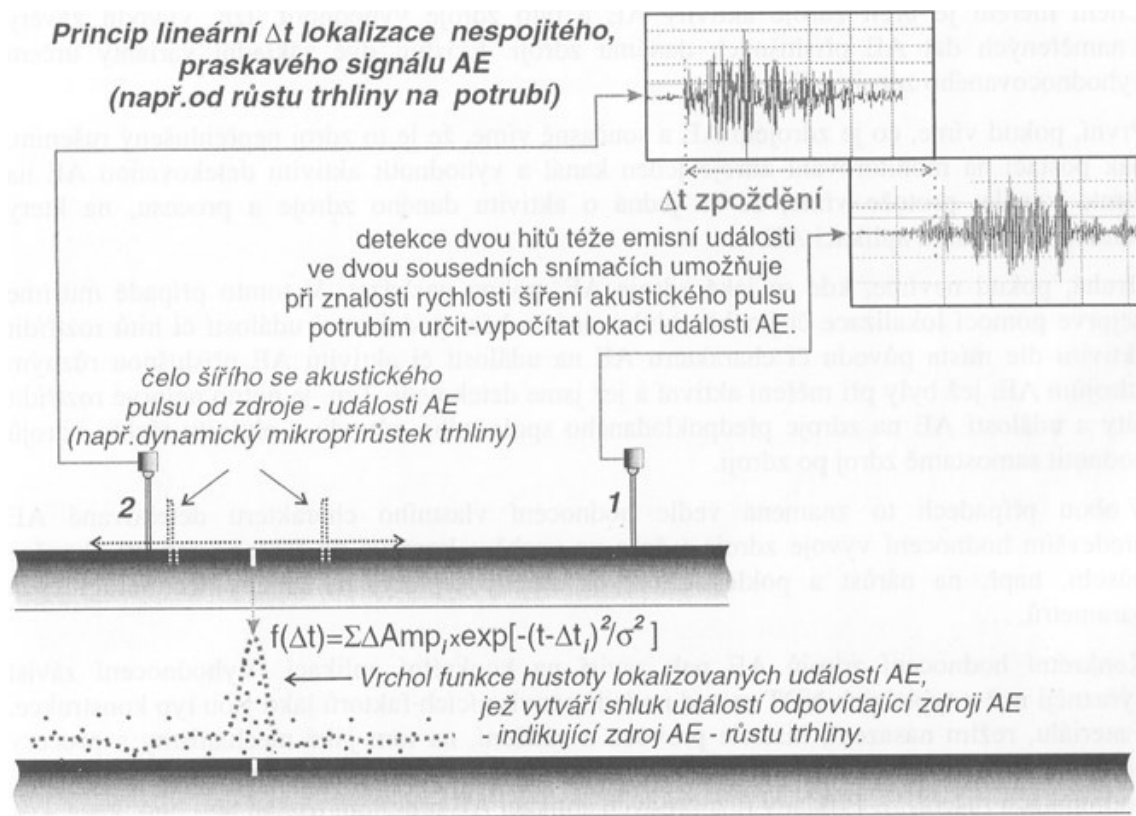
Základní parametry hitu signálu AE jsou zobrazeny na obrázku na další straně.



Obr. 2.10 Parametry signálu AE [10]

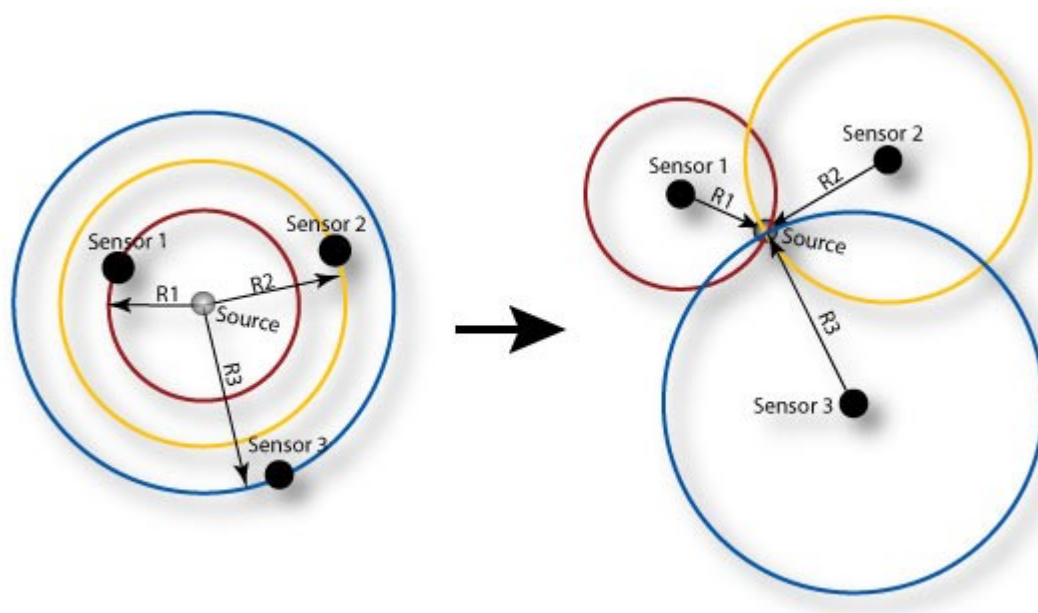
2.12 Lokalizace zdroje AE

Lokalizace zdroje AE je založena na rozdílu příchodu k jednotlivým snímačům. Předpokládá se, že rychlost propagace vlny je v celém materiálu stejná. Tento předpoklad ovšem není stoprocentně správný, jelikož z důvodu nedokonalostí materiálu, různých vad nebo nehomogenit, skutečně může docházet k drobné změně rychlosti vlny. Absolutní chyba je ale malá, takže je možné dosáhnout, s předpokladem konstantní rychlosti šíření vlny, dostatečně přesných výsledků. Lokalizace zdroje AE tímto způsobem lze použít pouze v případě nespojitě AE. V případě spojitě emise AE nelze rozlišit jednotlivé události, tudíž nelze měřit čas. Nejjednodušším příkladem je lokalizace zdroje pomocí lineární lokalizace, tak jak to je představeno na obr... Je vidět že zdroj AE je blíž snímači nalevo, takže k němu přijde vlna nejdřív. Až o nějaký čas Δt , přijde vlna ke druhému snímači vpravo. Provedení jedné lokalizace ovšem nemusí být úplně přesné, proto je vhodné vypočítat polohu zdroje několikrát po sobě. V místě s největším shlukem bodů bude největší pravděpodobnost zdroje AE. Tento princip lineární lokalizace se dvěma snímači je velmi vhodný pro lokalizaci například úniků média z dopravního potrubí.



Obr. 2.11 Lineární lokalizace [6]

Na stejném principu je založena plošná lokalizace zdroje. Rozdíl ovšem spočívá v nutnosti použít tři snímače místo dvou. Téma planární lokalizace je ve větší míře rozvinuto v pozdějších kapitolách. Obdobný princip používá rovněž prostorová lokalizace s tím rozdílem, že potřebuje čtyři snímače.



Obr. 2.12 Planární lokalizace [14]

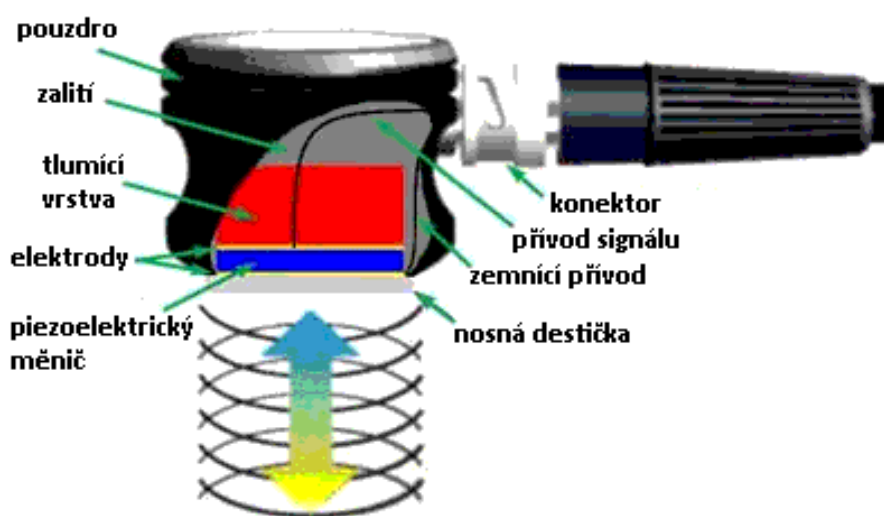
2.13 Detekce AE

2.13.1 Snímače

Snímač akustické emise základní zařízení při detekci a zpracování AE. Snímač je pevně spojen s povrchem zkoušeného tělesa. Snímač zachycuje elastické napěťové vlny a převádí je, pomocí různých fyzikálních principů, na elektrický nízkonapěťový signál. Snímačů je několik druhů například často používaná piezoelektrický, piezorezistivní, elektromagnetický, elektroakustický, fotoakustický, magnetostrikční, kapacitní. Základní frekvenční rozsah, ve kterém snímače pracují, je od 30 kHz až po 1 MHz. V dnešních dobách ovšem existují další specifické snímače, které posouvají tento rozsah ještě dál. Je třeba se rozhodnout pro použití správného snímače pro konkrétní aplikaci. Dobře zvážit se musí frekvenční charakteristika, citlivost, pracovní prostředí, jako je pracovní teplota nebo prostorové omezení a v neposlední řadě náklady na pořízení.

2.13.2 Piezoelektrický snímač

Tento druh snímače je velmi hojně využíván pro svoje značné výhody. Funguje na principu piezoelektrického jevu. Deformovaný piezokrystal vytváří elektrické napětí úměrné deformaci. Elastické vlny na povrchu tělesa stlačují piezoelektrický člen uvnitř snímače a tím se informace o vlně transformuje na elektrický signál.



Obr. 2.13.1 Schéma piezoelektrického snímače [15]

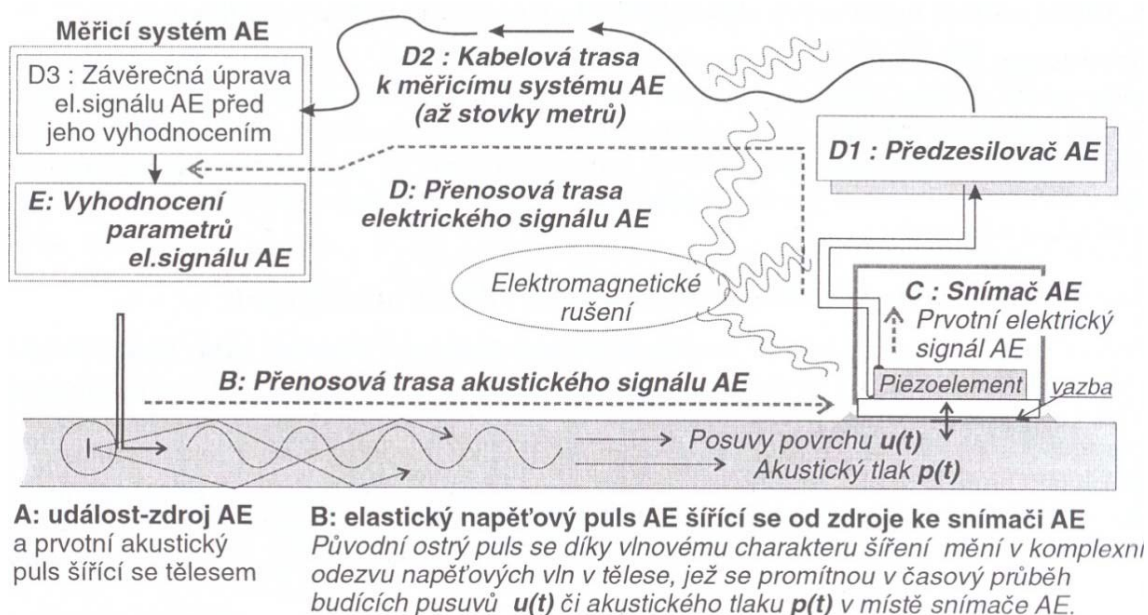
Pro dobrý přenos informace je nutné zajistit spolehlivé spojení mezi snímačem a povrchem. Toho se docílí pomocí speciálních vazebných prostředků, často na bázi gelu.

2.13.3 Kalibrace

Je známo, že elastické vlny se převádějí na elektrický signál. Je, ale třeba určit v jakém poměru. Absolutní kalibraci se rozumí zjištění poměru odezvy elektrického napětí, měřeného ve Voltech, na buzení, které se udává v metrech nebo Pascalech. Elektrická odezva a buzení jsou reprezentovány časovým průběhem. Vychází se tedy ze záznamu průběhu elektrického signálu závislého na pulsu mechanického buzení.

2.13.4 Měřicí technika předzesilovač kabely

Měřicí technika se nejčastěji skládá ze snímače AE, předzesilovače, vodících kabelů, filtru, zesilovače, spektrálního analyzátoru nebo osciloskopu a zobrazovacího zařízení, kterým může být počítač s patřičným softwarovým vybavením.



Obr. 2.13.2 Schéma přenosové trasy signálu AE [6]

Snímač zachycuje elastické vlny a generuje napětí. Generované napětí je ovšem velmi malé nebylo by ho možné vést kabely někdy až stovky metrů do vyhodnocovacího zařízení. Proto se používají předzesilovače, které signál zesilují. Existují zesilovače zabudované přímo do pouzdra snímače a tvoří tak jeden celek. To je vůbec nejlepší cesta pro kvalitu získaného signálu. Pro vysokou cenu se ale u méně náročných aplikací

používají předzesilovače externí, které jsou umístěny ve vzdálenosti maximálně několik metrů od snímače. Spojeny musí být speciálními kabely, které jsou schopné dobře izolovat převáděný signál od okolních rušivých elementů jako je elektromagnetické rušení. Nejlepším řešením je vést kabelovou trasu daleka od ostatních elektrických tras, než spoléhat na izolaci kabele. V některých případech může být rušení natolik silné, že získaný signál je z důvodu své deformace naprosto nepoužitelný. Měřicí zařízení provádějí úpravu signálu. Zesílí nebo ztlumí signál a vyfiltruje nežádané frekvence. Takto připravený signál je už možné digitalizovat.

2.13.5 Vyhodnocení signálu AE

Digitalizovaný signál AE se následně zpracovává vyhodnocovacím zařízením, které sleduje parametry signálu AE. Tabulka v řádcích zobrazuje počet kanálů a ve sloupcích úroveň vyhodnocení signálu AE.

	Informativní	Standardní	Pokročilá
Jeden	1A	1B	1C
2 až cca 6	2A	2B	2C
mnoho	3A	3B	3C

Tab. 2.13.1 Tabulka složitosti vyhodnocení signálu AE [6]

3. Stanovení cíle práce

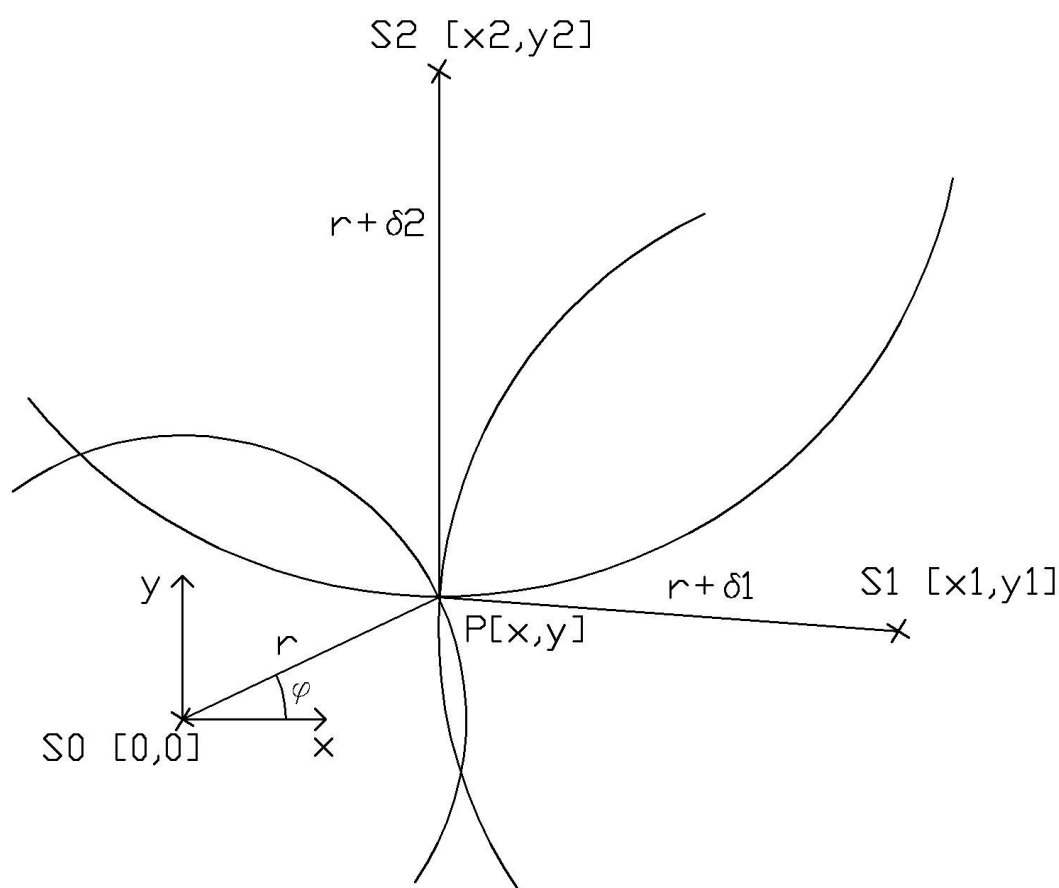
Cílem této bakalářské práce bude více porozumět problematice plošné lokalizace zdrojů akustické emise. Takže je potřeba analyzovat a pochopit princip fungování lokalizačních algoritmů. Sestavit matematický popis lokalizace a analyzovat specifické případy polohy zdroje. Dále je třeba vybraným způsobem převést lokalizační algoritmus do programové podoby. Tento program musí být schopný navíc určit reálnou amplitudu zdroje pomocí útlumové křivky podle normy ČSN EN 14584.

Druhým cílem práce bude vyzkoušet navržený program. Experimentálním měřením se získají reálné hodnoty z reálné situace. Z těchto hodnot se programem vypočítají souřadnice zdroje a reálná amplituda zdroje. Výsledky se následně porovnají s reálnými hodnotami. Touto analýzou se dojde k závěru, jestli jsou výsledky dostatečně přesné a jestli je vytvořený program použitelný.

4. Tvorba lokalizačního programu

4.1 Princip fungování lokalizačního algoritmu

Časový rozdíl v příchodech akustické vlny do dvou různě umístěných snímačů definuje rozdíl ve vzdálenostech mezi zdrojem AE a jednotlivými snímači. Pomocí tohoto rozdílu délek je možné definovat hyperbolu se senzory v ohniscích. Na křivce hyperboly pak musí ležet zdroj AE. Použitím tří senzorů se získají dvě hyperboly, které se vzájemně protínají. Průsečík hyperbol pak definuje bod, ve kterém musí ležet zdroj, ze kterého vychází AE. Rovnice popisující hyperboly, které jsou postavené na základě rozdílu času příchodu, obsahují kořeny čtvrtého řádu, takže nalezení analytického řešení je velice obtížné. Použitím alternativního přístupu, podobného do konstrukce Apollonovy kružnice, lze analytické řešení lokalizace zdroje zjednodušit.



Obr. 4.1 Rozmístění senzorů a zdroje

Nechť jsou definovány tři senzory se souřadnicemi:

$S_0[0,0]$ – senzor umístěný v počátku souřadného systému

$S_1[x_1,y_1]$ – libovolné souřadnice

$S_2[x_2,y_2]$ – libovolné souřadnice

Nechť je definován zdroj akustické emise se souřadnicemi:

$P[x,y]$

Kružnice mají definovaný následující poloměr

r – pro kružnici se středem v počátku souřadného systému

$r + \delta_1$ – pro kružnici se středem v bodě S_1

$r + \delta_2$ – pro kružnici se středem v bodě S_2

dále platí

$$\delta_1 = PS_1 - PS_0 = t_1 * v \quad (4.1)$$

$$\delta_2 = PS_2 - PS_0 = t_2 * v \quad (4.2)$$

kde

t_1 je časový rozdíl příchodu vlny mezi snímači v bodech S_0 a S_1

t_2 je časový rozdíl příchodu vlny mezi snímači v bodech S_0 a S_2

v je rychlost šíření vlny

Rovnice kružnic:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (4.3)$$

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = (r + \delta_1)^2 \quad (4.4)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = (r + \delta_2)^2 \quad (4.5)$$

Rovnice 4.4 a 4.5 lze roznásobit

$$x^2 - 2*x*x_1 + x_1^2 + y^2 - 2*y*y_1 + y_1^2 = r^2 + 2*r*\delta_1 + \delta_1^2 \quad (4.6)$$

$$x^2 - 2*x*x_2 + x_2^2 + y^2 - 2*y*y_2 + y_2^2 = r^2 + 2*r*\delta_2 + \delta_2^2 \quad (4.7)$$

Rovnici 4.3 odečtu od rovnice 4.6 a rovnici 4.3 odečtu od rovnice 4.7

$$2*x*x_1 + 2*y*y_1 = (x_1^2 + y_1^2 - \delta_1^2) - 2*v*\delta_1 \quad (4.8)$$

$$2*x*x_2 + 2*y*y_2 = (x_2^2 + y_2^2 - \delta_2^2) - 2*v*\delta_2 \quad (4.9)$$

Tímto získám soustavu dvou rovnic, která určuje souřadnice zdroje.

x, y – souřadnice zdroje jako výstupní parametry

$x_1, y_1, x_2, y_2, \delta_1, \delta_2$ – vstupní parametry

Rovnice 4.10 a 4.11 pro převod kartézského souřadného systému na polární, dosadím do rovnice 4.8 resp. 4.9.

$$x = r * \cos \varphi \quad (4.10)$$

$$y = r * \sin \varphi \quad (4.11)$$

$$2*r*\cos \varphi*x_1 + 2*r*\sin \varphi*y_1 + 2*r*\delta_1 = x_1^2 + y_1^2 - \delta_1^2 \quad (4.12)$$

$$2*r*\cos \varphi*x_2 + 2*r*\sin \varphi*y_2 + 2*r*\delta_2 = x_2^2 + y_2^2 - \delta_2^2 \quad (4.13)$$

Souřadnice zdroje jsou nyní definovány pomocí poloměru r a úhlu φ .

Zavedu substituci

$$A_1 = x_1^2 + y_1^2 - \delta_1^2 \quad (4.14)$$

$$A_2 = x_2^2 + y_2^2 - \delta_2^2 \quad (4.15)$$

Takže platí

$$2*r*(x_1*\cos \varphi + y_1*\sin \varphi + \delta_1) = A_1 \quad (4.16)$$

$$2*r*(x_2*\cos \varphi + y_2*\sin \varphi + \delta_2) = A_2 \quad (4.17)$$

Pokud se závorky nerovnají nule, můžu psát

$$r = \frac{A_1}{2 * (x_1 * \cos \varphi + y_1 * \sin \varphi + \delta_1)} = \frac{A_2}{2 * (x_2 * \cos \varphi + y_2 * \sin \varphi + \delta_2)} \quad (4.18)$$

Po roznásobení

$$A_1 * x_2 * \cos \varphi + A_1 * y_2 * \sin \varphi + A_1 * \delta_2 = A_2 * x_1 * \cos \varphi + A_2 * y_1 * \sin \varphi + A_2 * \delta_1 \quad (4.19)$$

$$(A_1 * x_2 - A_2 * x_1) * \cos \varphi + (A_1 * y_2 - A_2 * y_1) * \sin \varphi = A_2 * \delta_1 - A_1 * \delta_2 \quad (4.20)$$

Rovnici podělím rovnicí

$$B = [(A_1 * x_2 - A_2 * x_1)^2 + (A_1 * y_2 - A_2 * y_1)^2]^{0,5} \quad (4.21)$$

Získám

$$\begin{aligned} & \frac{(A_1 * x_2 - A_2 * x_1) * \cos \varphi}{B} + \frac{(A_1 * y_2 - A_2 * y_1) * \sin \varphi}{B} \\ & = \frac{A_2 * \delta_1 - A_1 * \delta_2}{B} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Zavedu substituci

$$(A_1 * x_2 - A_2 * x_1) = a \quad (4.23)$$

$$(A_1 * y_2 - A_2 * y_1) = b \quad (4.24)$$

Pomocí Pythagorovy věty lze definovat

$$[(A_1 * x_2 - A_2 * x_1)^2 + (A_1 * y_2 - A_2 * y_1)^2]^{0,5} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (4.25)$$

$$\frac{A_2 * \delta_1 - A_1 * \delta_2}{B} = k \quad (4.26)$$

Platí

$$\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} * \cos \varphi + \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} * \sin \varphi = k \quad (4.27)$$

Dále platí

$$\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \leq 1; \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \leq 1 \quad (4.28)$$

Můžu použít vzorec

$$\cos(x - y) = \cos x * \cos y + \sin x * \sin y \quad (4.29)$$

$$\cos(\varphi - \theta) = \cos \varphi * \cos \theta + \sin \varphi * \sin \theta \quad (4.30)$$

Zavedu substituci

$$\cos \theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}; \sin \theta = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (4.31)$$

Potom můžu napsat

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \frac{\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}{\frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}} = \frac{a}{b} \quad (4.32)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{(A_1 * y_2 - A_2 * y_1)}{(A_1 * x_2 - A_2 * x_1)} \quad (4.33)$$

Čitatel i jmenovatel ve vzorci pro $\operatorname{tg} \theta$ je možné vypočítat, pokud jsou známy všechny vstupní hodnoty. To znamená souřadnice snímačů, rychlost šíření vlny a časové zpoždění příchodu mezi snímači. Dále se pomocí rovnic 4.27 a 4.30 sestaví následující rovnice, která definuje úhel φ .

$$\cos(\varphi - \theta) = k = \frac{A_2 * \delta_1 - A_1 * \delta_2}{[(A_1 * x_2 - A_2 * x_1)^2 + (A_1 * y_2 - A_2 * y_1)^2]^{0,5}} \quad (4.34)$$

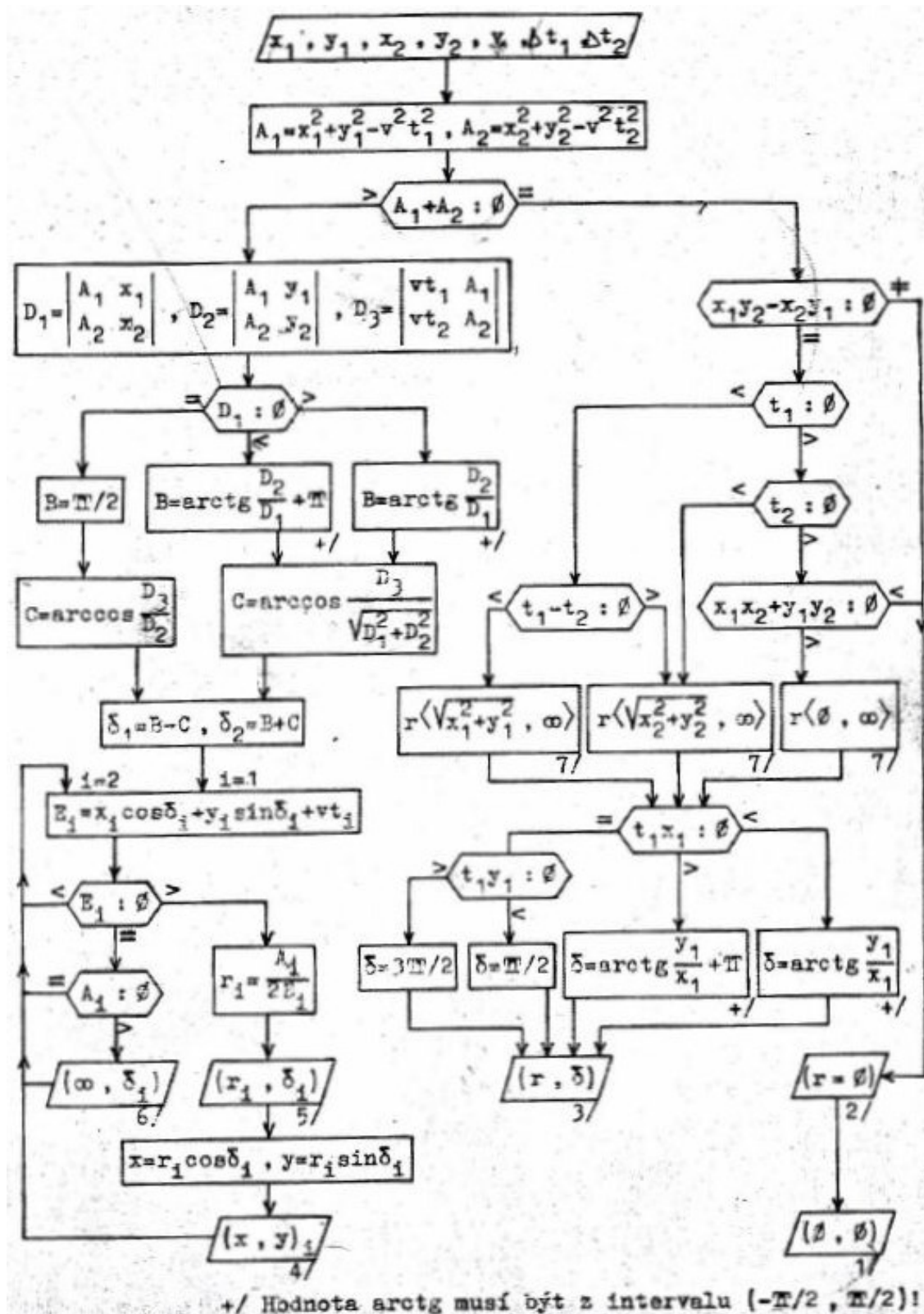
Dosažením úhlu φ do rovnice 4.18 je definován poloměr r .

Toto obecné řešení je dále zpracováno pro specifické případy a následně rozepsáno do vývojového diagramu uvedeného níže, který zahrnuje všechny specifické rozmístění rovině. Výsledky očíslované v diagramu 1/ a 2/ určují souřadnice zdroje do počátku souřadného systému. Výsledky označené číslicemi 3/, 4/ a 5/ jsou jednoznačné pouze v případě, že jeden z cyklů $i=1, 2$ je ukončen před získáním výsledku. Výsledek číslo 6/ určí pouze směr, ve kterém se zdroj v nekonečnu nachází.

Dvojznačné výsledky jsou získané v případě 4/, 5/, 6/, kdy proběhnou oba cykly $i=1,2$.

Mnohoznačný výsledek v případě 3/, kdy zdroj může ležet ve všech bodech přímky ve směru δ , kde interval poloměru r je definován výsledkem 7/.

Výpočet je ukončen po dosažení výsledku 1/, 3/ a u výsledků 4/, 6/ po dokončení obou cyklů $i=1,2$.



Obr. 4.2 Schéma lokalizačního algoritmu

Na základě tohoto diagramu jsem vytvořil zdrojový kód programu. Lokalizační program jsem vytvořil jako skript pomocí programu Matlab R2017a. K přepsání algoritmu mi stačily pouze funkce if a else. Funkční program je přiložen na CD disku v příloze v kapse

na zadní desce. Pro spuštění programu je třeba v aplikaci Matlab otevřít skript a v příkazovém okně napsat příkaz zobrazená níže a zadat vstupní parametry ve správném tvaru a pořadí.

>>lokalizaceAE (x1, y1, x2, y2, v, t1, t2, e, dmax, A002, A20e, Admax, Am)

První snímač musí být v počátku souřadného systému. Proto se zadává jenom souřadnice zbylých dvou snímačů v milimetrech - x1, y1, x2, y2,

v je rychlost šíření vlny a musí být zadána v mm/ μ s,

t1 je rozdíl času mezi příchodem vlny k prvnímu a druhému snímači v μ s,

t2 je rozdíl času mezi příchodem vlny k prvnímu a třetímu snímači v μ s,

Další vstupní hodnoty se týkají korekce amplitudy zdroje se vzdáleností a blíže se o nich píše v další kapitole.

e je tloušťka materiálu v metrech,

dmax je vzdálenost zadávána v metrech,

A002, A20e, Admax, Am jsou amplitudy zadávané v dB_{AE},

Po potvrzení vstupních hodnot se pod sebou zobrazí vypočítané hodnoty

soux – je xová souřadnice zdroje [mm],

souy – je ypsilonová souřadnice zdroje [mm],

dA – útlum amplitudy [dB_{AE}],

Ac – korigovaná maximální amplituda zdroje [dB_{AE}],

Můžou nastat specifické případy, kdy souřadnice není možné vypočítat. V tom případě program zahlásí chybu proměnné soux. Existují rovněž případy, kdy není možné jednoznačně určit souřadnice zdroje. Potom program napíše pro souřadnici x *'nekonecno'* a pro souřadnici ypsilon úhel mezi přímkou, na které se zdroj nachází a kladnou osou, Pro další nejednoznačný případ, kdy lze určit pouze v polárních souřadnicích interval poloměru a úhel přímky, na kterém se zdroj nachází, objeví se pro soux *'interval od r do nekonecna'*, a zároveň se vypíše poloměr r, a pro souy úhel

sklonu přímky od kladné osy x. Pro případ, kdy existují dvě možné souřadnice zdroje, se vypíší obě. Pokud nastane nějaký případ z výše jmenovaných, pak pro získání jednoznačného výsledku stačí použít jiné rozmístění snímačů.

```

1  function [soux, souy, soux2, souy2, Ac] = lokalizaceAE
2  - A1=x1^2+y1^2-v^2*t1^2;
3  - A2=x2^2+y2^2-v^2*t2^2;
4  - B=0; C=0;
5  - if A1+A2>0
6  -     mt1=[A1 x1;A2 x2];
7  -     mt2=[A1 y1;A2 y2];
8  -     mt3=[v*t1 A1; v*t2 A2];
9  -     D1=det(mt1);D2=det(mt2);D3=det(mt3);
10
11     if D1==0
12         B=pi/2; C=acos(D3/D2);
13     elseif D1<0
14         B=atan(D2/D1)+pi; C=acos(D3/sqrt(D1^2+D2^2));
15     elseif D1>0
16         B=atan(D2/D1); C=acos(D3/sqrt(D1^2+D2^2));
17     end
18     delta1=B-C;
19     delta2=B+C;
20
21     E1=x1*cos(delta1)+y1*sin(delta1)+v*t1;
22     E2=x2*cos(delta2)+y2*sin(delta2)+v*t2;
23     if E1<0
24         if E2<0
25             soux='nelze urcit'
26             souy='nelze urcit'
27         elseif E2==0
28             if A2==0
29                 soux='nelze urcit'
30                 souy='nelze urcit'
31             elseif A2>0
32                 soux='nekonecno'
33                 souy=delta2
34             end
35         elseif E2>0
36             r2=A2/(2*E2);
37             soux=r2*cos(delta2)
38             souy=r2*sin(delta2)
39         end
40     elseif E1==0
41         if A1==0
42             if E2<0
43                 soux='nelze urcit'
44                 souy='nelze urcit'
45             elseif E2==0
46                 if A2==0
47                     soux='nelze urcit'
48                     souy='nelze urcit'
49                 elseif A2>0

```

Obr. 4.3 Zdrojový kód lokalizačního algoritmu

4.2 Korekce maximální amplitudy se vzdáleností

Pokud znám amplitudu vlny naměřenou ve známé vzdálenosti od zdroje, můžu pomocí útlumové křivky určit původní amplitudu zdroje. Jak se vlna šíří materiálem, se vzdáleností se rozptyluje, ztrácí svou energii a amplituda klesá. Útlum není na vzdálenosti lineárně závislý. Norma ČSN EN 14584 stanovuje pravidla pro výpočet amplitudy zdroje AE. Útlumovou křivku je možné aproximovat pomocí dvou přímk. Lineární aproximace, která je zobrazena na obrázku 4.4, je velmi jednoduchá metoda aproximace. Přináší do výpočtu určitou chybu, ale konečný výsledek je dostatečně přesný pro běžné měření. Pro konstrukci útlumové křivky je třeba mít zdroj AE se známou polohou. Dále je třeba změřit maximální amplitudu zdroje ve třech specifických místech. Na obrázku 4.4 jsou označena následovně:

- 0,02 – znamená vzdálenost od zdroje 0,02 [mm],
- 20e – vzdálenost dvacetinásobku tloušťky stěny [mm],
- e – tloušťka tělesa [mm],
- dmax – volitelná vzdálenost větší než 20e [mm], v těchto místech je třeba změřit maximální amplitudu zdroje.
- A002 - změřená maximální amplituda zdroj ve vzdálenosti 0,02 metru od zdroje [dB_{AE}],
- A20e – maximální amplituda zdroje ve vzdálenosti 20e [dB_{AE}],
- Admax – maximální amplituda zdroje ve vzdálenosti dmax [dB_{AE}],

Tímto se získají tři body, které definují útlumovou křivku. Tato křivka se dělí na dvě oblasti. Od vzdálenosti 0,02 metru po 20e se jedná o oblast blízkého pole. V tomto poli se počítá s koeficientem útlumu blízkého pole, který v zásadě označuje sklon křivky.

β – koeficient útlumu blízkého pole [dB/m], který je definován následovně

$$\beta = \frac{A_{002} - A_{20e}}{20e - 0,02} \text{ [dB/m]} \quad (4.35)$$

Pro vzdálenosti větší než 20e, se mluví o útlumu v dalekém poli. Sklon křivky je jiný, z toho důvodu se definuje koeficient útlumu dalekého pole.

α – koeficient útlumu vzdáleného pole [dB/m], je definován vztahem:

$$\alpha = \frac{A_{20e} - A_{dmax}}{d_{max} - 20e} \text{ [dB/m]} \quad (4.36)$$

Samotné užití útlumové křivky pro korekci amplitudy zdroje se provádí následovně.

Na obrázku 4.4 je zaznačena délka d.

d – vzdálenost mezi zdrojem a vybraným místem měření [mm],

A_m – maximální amplituda zdroje v místě měření [dB_{AE}],

Pokud bod, ve kterém je prováděno měření, je v blízkém poli, pak se útlum ΔA vypočítá

$$\Delta A = \beta * (d - 0,02) \text{ [dB}_{AE}] \quad (4.37)$$

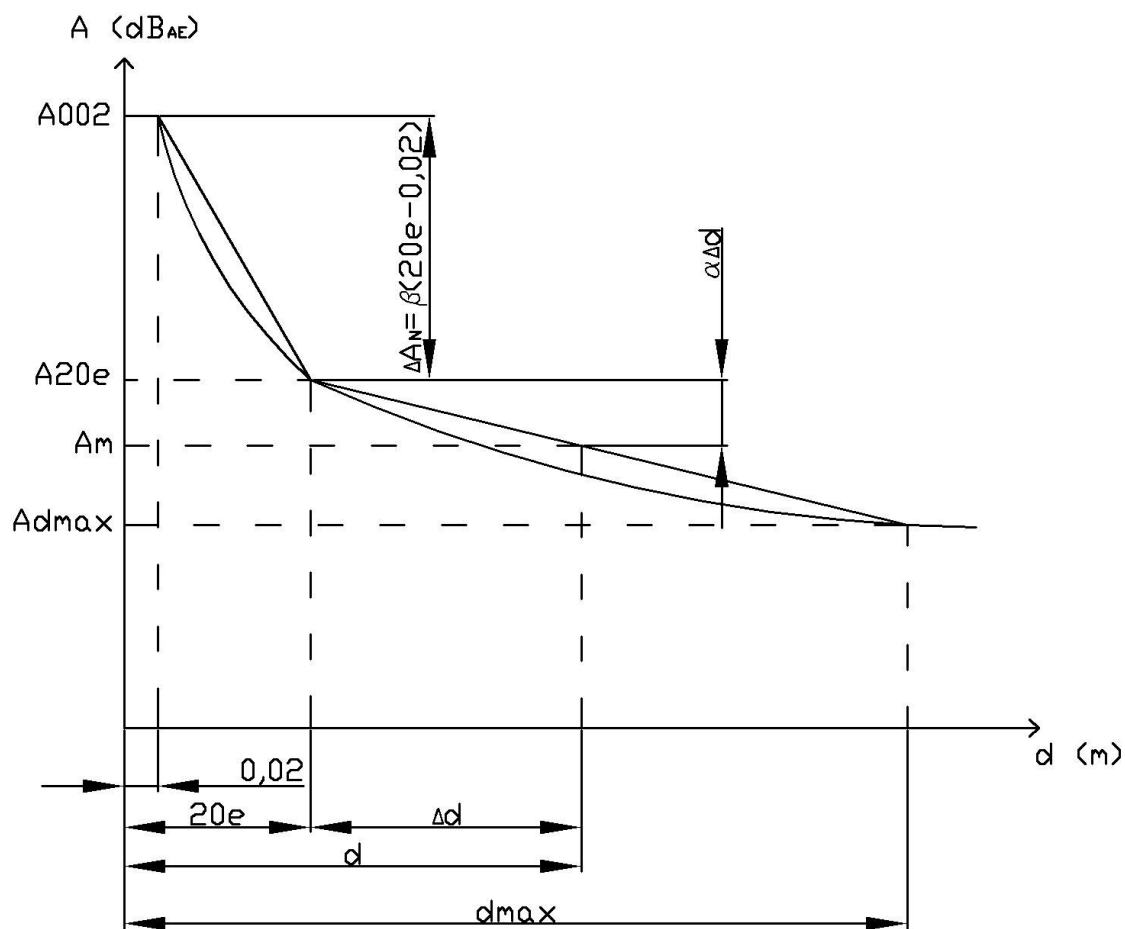
Pokud se měřicí bod nachází ve vzdáleném poli, pak se útlum vypočítá podle vztahu:

$$\Delta A = \beta * (20e - 0,02) + \alpha * (d - 0,02) \text{ [dB}_{AE}] \quad (4.38)$$

Pro korekci maximální amplitudy zdroje pak stačí připočíst útlum k naměřené maximální amplitudě zdroje.

$$A_c = \Delta A + A_m \text{ [dB}_{AE}] \quad (4.39)$$

A_c – na vzdálenosti korigovaná maximální amplituda zdroje [dB_{AE}]



Obr. 4.4 Zobrazení závislosti amplitudy na vzdálenosti

5. Ověření programu experimentem

5.1 Měřicí sestava

Pro experimentální ověření programu jsme použili sestavu využívající.

- Snímač Vallen systeme VS150-M,
- Snímač Digital wave B454,
- Kabel CBL-1-1M2-V5,
- Předzesilovač Vallen systeme AEP5,
- Multikanálový procesor akustického signálu Vallen systeme AMSY-6 SP2,
- Digitální osciloskop Ronde Schwarz RTH1002,
- Počítač se softwarem Vallen Visual AE,



Obr. 5.1 Snímač Vallen systeme VS150-M [16]



Obr. 5.2 Předzesilovač Vallen systeme AEP5 [17]



Obr. 5.3 Budič Digital wave B454 [18]

Měření jsme provedli na 2 mm tlustém ocelovém plechu. Snímače jsme připevnili na plech pomocí vazebného akustického gelu. Na plechu jsou nakresleny osy kartézského souřadného systému pro lepší orientaci. Souřadnice snímačů jsou následující:

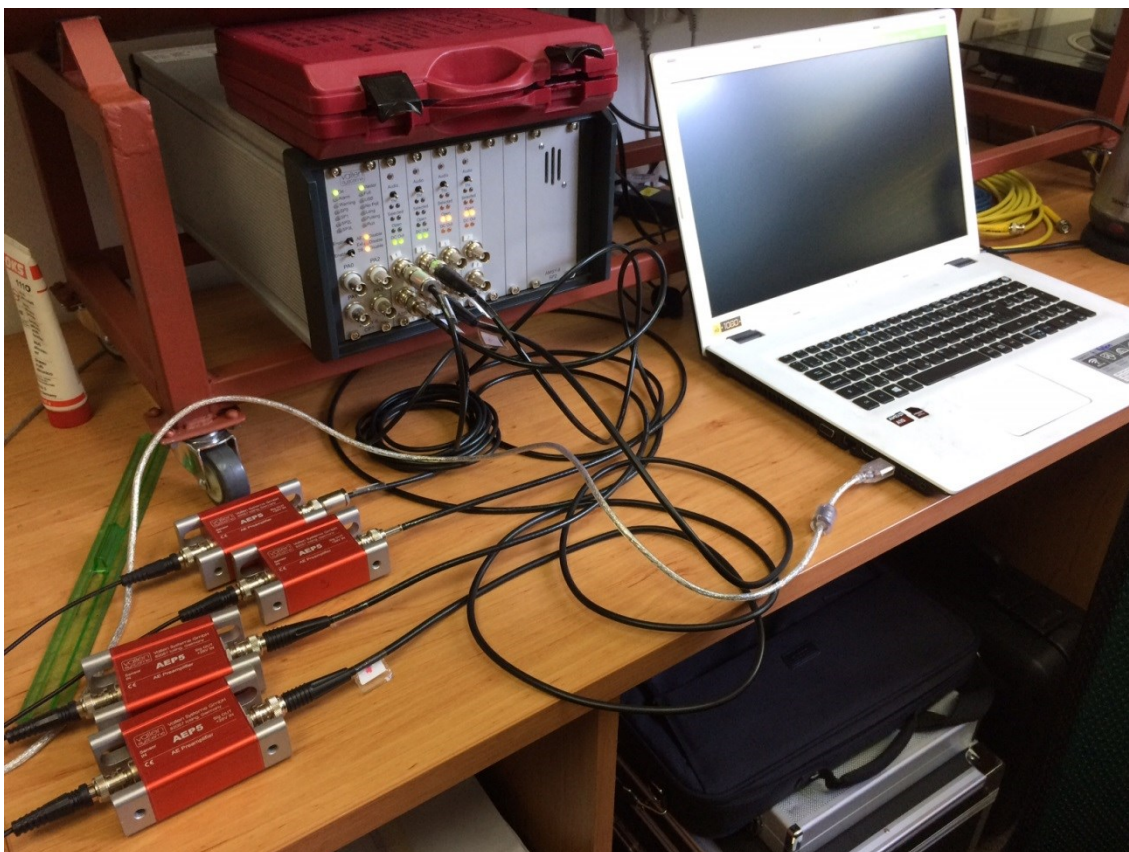
$S_0=[0,0]$ [mm] – snímač číslo jedna umístěný v počátku souřadného systému

$S_1=[450,0]$ [mm] – snímač číslo dvě

$S_2=[0,300]$ [mm] – snímač číslo tři



Obr. 5.4 Sestava snímačů



Obr. 5.5 Měřicí sestava

5.2 Zjišťování útlumové křivky

Podle postupu popsaného v kapitole Korekce maximální amplitudy se vzdáleností, byly změřeny maximální amplitudy pro konstrukci útlumové křivky.

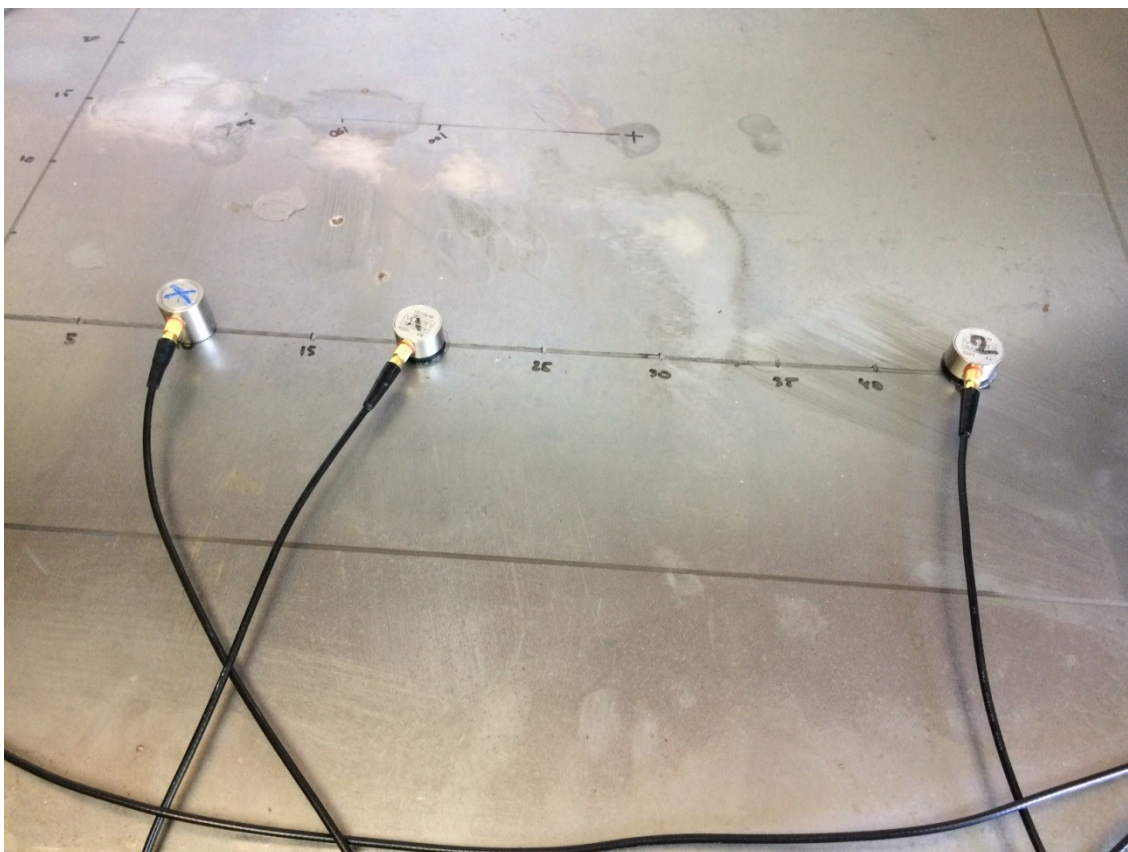
$$A_{002} = 95 \text{ dB}_{\text{AE}}$$

$$A_{20e} = 93,2 \text{ dB}_{\text{AE}}$$

$$A_{\text{dmax}} = 64,8 \text{ dB}_{\text{AE}}$$

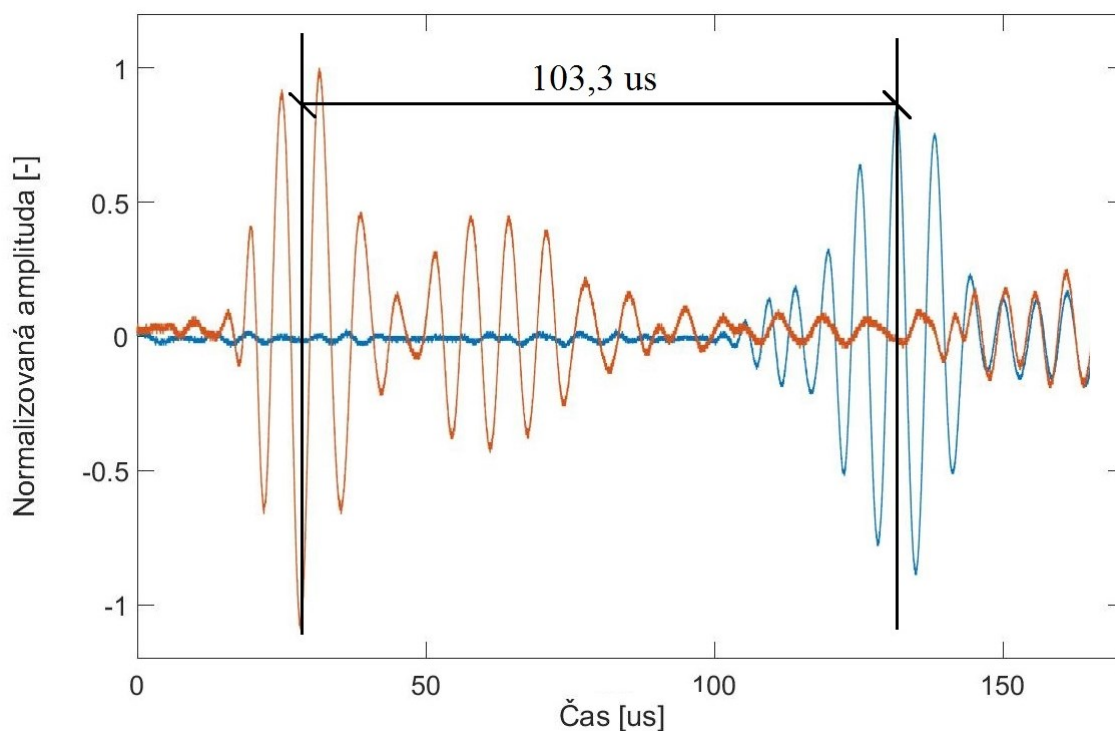
5.3 Měření rychlosti elastické vlny

Rychlost šíření elastické vlny v oceli je $3,2 \text{ mm}/\mu\text{s}$. Tato hodnota je běžně používána a je implicitně nastavena v programu. Pro zvýšení přesnosti výpočtu je vhodné změřit rychlost vlny v aktuálních specifických podmínkách. Z toho důvodu jsme provedli toto měření se sestavou zobrazenou na obrázku níže. Použili jsme dva snímače označené číslicí 1 pro levý snímač a 2 pro pravý snímač, vzdálené od sebe 260 mm. Úplně vlevo je na desku připevněn budič, který generuje vlny.



Obr. 5.6 Měření rychlosti

Princip měření je velmi jednoduchý. Vytvořená vlna se šíří materiálem konstantní rychlostí. Když dorazí k prvnímu snímači, je zaznamenána snímačem a zobrazí se na obrazovce. Pak se šíří dál a později dorazí ke druhému snímači. Ten vlnu zaznamená a znovu se zobrazí na obrazovce. V měřicím softwaru je pak možné odečíst časový rozdíl příchodu vlny k jednotlivým snímačům. Obrázek níže ukazuje zachycené průběhy z měřicího softwaru. Červenou křivkou je vykreslen zachycený signál z prvního snímače a modrou křivkou signál z druhého snímače. Z důvodu nesprávného odečtu hodnot je často rychlost vypočtena nepřesně. V tomto případě jsme časovou hodnotu definovali jako vzdálenost těžišť obrazců, protože tato metoda dává větší přesnost.



Obr. 5.7 Zachycený signál prvním a druhým snímačem

Pokud znám vzdálenost a čas, za který byla vzdálenost uražena, pak jednoduchým vzorcem můžu vypočítat rychlost pohybu.

$$v = \frac{s}{t} = \frac{260}{103,3} = 2,517 \text{ mm}/\mu\text{s} \quad (5.1)$$

$s = 260 \text{ mm}$ - vzdálenost mezi snímači

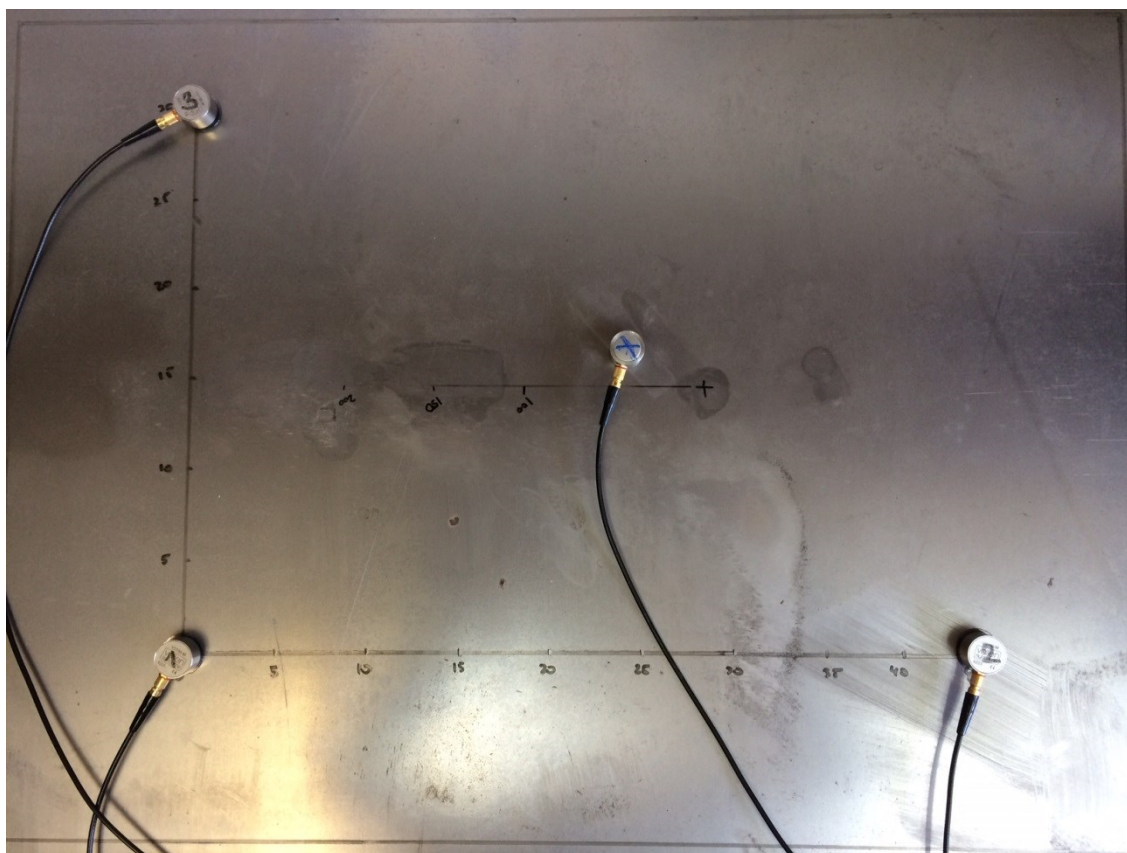
$t = 103,3 \mu\text{s}$ – časový rozdíl v příchodu do prvního a druhého snímače

Změřená rychlost šíření vlny byla 2,517 a tuto hodnotu jsem použil v programu pro výpočet souřadnice zdroje AE.

5.4 Lokalizace zdrojů dosažené výsledky

Vybral jsem si a zapsal do tabulky 10 náhodných souřadnic zdroje. Software, který jsem použil, měl funkci stopky. To znamená, že stopky se spustily příchodem vlny do prvního snímače a zastavily v momentě příchodu vlny do druhého snímače. Tu samou funkci bylo možné použít pro první a třetí snímač. Tímto jsem vyřešil problém při zjišťování diferencí času. Zapsal jsem do tabulky všechny časy odpovídající příslušným

souřadnicím zdroje a všechny amplitudy naměřené v daném místě. Následně jsem získané hodnoty zadal do programu a výsledky jsem opět zapsal do tabulky níže.



Obr. 5.8 Ukázka měření

	Naměřené hodnoty				Vypočítané hodnoty	
Měření	t1 [μs]	t2[μs]	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
1.	67,4	43,5	122	75	135	74
2.	28,7	57,2	177	21	189	24
3.	108,2	46,7	60	78	75	83
4.	70	1,1	100	150	117	148
5.	133,5	47,8	35	90	30	88
6.	68,9	74,1	120	15	138	6
7.	110,8	14,5	50	150	52	131
8.	16,8	2,2	185	145	200	145
9.	47,7	51,3	150	45	163	49
10.	11	37,2	200	60	211	66

Tab. 5.1 Skutečné a vypočítané souřadnice zdroje

Měření	Naměřená amplituda [dB _{AE}]	Korigovaná amplituda zdroje [dB _{AE}]	Přesnost [%]	Odchylka [dB _{AE}]
1.	85,1	93,9	98,8	1,1
2.	81,3	92,4	97,3	2,6
3.	88,2	94,4	99,4	0,6
4.	81,1	92,1	96,9	2,9
5.	91,7	96,8	98,1	1,8
6.	89,4	97,3	97,6	2,3
7.	81,8	89,8	94,5	5,2
8.	80,0	94,6	99,6	0,4
9.	83,3	93,2	98	1,8
10.	81,1	94,0	98,9	1,0

Tab. 5.2 Naměřené a vypočítané amplitudy

Průměrná přesnost 97,9%, maximální odchylka 5,2 [dB_{AE}].

Měření	Naměřené hodnoty		Vypočítané hodnoty		Přesnost		Odchylka	
	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]	x [%]	y [%]	x [mm]	y [mm]
1.	122	75	135	74	90	99	13	1
2.	177	21	189	24	94	88	12	3
3.	60	78	75	83	80	94	15	5
4.	100	150	117	148	85	99	17	2
5.	35	90	30	88	86	98	5	2
6.	120	15	138	6	87	40	18	9
7.	50	150	52	131	96	87	2	19
8.	185	145	200	145	93	100	15	0
9.	150	45	163	49	92	92	13	4
10.	200	60	211	66	95	95	11	6

Tab. 5.3 Porovnání výsledků

Průměrná přesnost 90% pro x, 89% pro y.

Maximální odchylka pro x 18 mm, pro y 19 mm.

6. Závěr

První úkolem bylo vybraný lokalizační algoritmus zpracovat do programové podoby. Nejprve jsem popsal princip fungování algoritmu z pohledu matematického a analyzoval jsem možné výsledky pro všechny polohy zdroje v rovině. Dále jsem s využitím programu Matlab, přepsal algoritmus, pomocí funkcí if a else, do programové podoby. Program funguje v příkazovém okně programu Matlab. Po zadání všech vstupních parametrů, program vypočte souřadnice zdroje. Do programu jsem implementoval funkci, která podle normy ČSN EN 14584 určuje reálnou amplitudu zdroje v dB_{AE} . Ze zadaných vstupních hodnot si vytvoří útlumovou křivku. Útlum je závislý na vzdálenosti, kterou si program automaticky zjistí z vypočítaných souřadnic zdroje. Podle ní provede korekci maximální amplitudy zdroje.

Druhým úkolem bylo ověřit navržený program s dostupným zařízením pro akustickou emisi na vhodné geometrii. Měření jsme provedli na ocelovém plechu s využitím tří piezoelektrických snímačů a jednoho generátoru vln. Změřil jsem všechny potřebné hodnoty pro 10 náhodně vybraných pozic zdroje. Následně jsem získané hodnoty zadal do vytvořeného programu. Výsledky jsem pak seřadil do přehledné tabulky. Průměrná přesnost lokalizace se pohybuje kolem 90 -ti %. Minimální přesnost při šestém měření je sice 40%, ale absolutní odchylka je 6 mm. Tedy velmi malé číslo. Obecně maximální odchylka činí pouze 19 mm. Pokud si uvědomím celkové rozměry plechu, tak možnost lokalizace zdroje s přesností do dvou centimetrů je víc než dostačující. Co se týče určení korekce amplitudy, tak zde jsou výsledky o ještě něco lepší. Průměrná přesnost zde vychází skoro na 98%. Maximální odchylka je sice $5,2\text{dB}_{\text{AE}}$, ale v ostatních případech se pohybují kolem $1,7\text{ dB}_{\text{AE}}$. Jelikož je výpočet amplitudy prováděn na relativně malé vzdálenosti, jsou rozptyly hodnot rovněž relativně malé. Pro větší vzdálenosti by byly rozptyly větší. Nikdy nejde docílit absolutně přesných výsledků. Vždycky budou zkreslené různými nepřesnostmi. Nicméně dosažené výsledky jsou podle mého názoru víc než dostačující a jsem s nimi, jak i s fungováním programu, spokojen.

Seznam použité literatury

- [1] GROSSE, U. Ch.; Ohtsu, M.: Acoustic emission testing, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, ISBN:978-3-540-69895-1
- [2] Technical Review: Acoustic emission source location, Bruel&Kjaer, No. 2, 1981, ISSN : 0007-2621
- [3] Technical Review: Advance Techniques in Acoustical, Electrical and Mechanical Measurement, Bruel&Kjaer, No. 2, 1979, ISSN : 0007-2621
- [4] Beattie, A. G.: Acoustic Emission Non-Destructive Testing of Structures using Source Location Techniques, Sandia Report (SAND2013-7779), Sandia National Laboratories, 2013
- [5] ČSN EN 14854: Nedestruktivní zkoušení – Akustická emise – Zkoušení kovových tlakových zařízení během přejímací zkoušky – Planární lokalizace zdrojů akustické emise
- [6] KOPEC, B. a kol. Nedestruktivní zkoušení materiálu a konstrukcí. 1. Vydání. Brno: CERM s.r.o., 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [7] Acoustic emission products. Euro physical acoustics [online].
Dostupné z: http://www.epandt.com/us/produits_ea_us.html
- [8] PAZDERA, L., SMUTNÝ, J., MAZAL, P. Využití metody akustické emise při sledování vlastností zatěžovaných materiálů a konstrukcí. Vysoké učení technické v Brně, 2004. 111 s. ISBN 80-214-2802-3.
- [9] STEIN, P. Kategorizace signálu akustické emise při cyklickém zatěžování dílců: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, 2010, 63 s. Vedoucí práce: Mazal, P.
- [10] Využití metody akustické emise v materiálovém inženýrství. Ústav konstruování - FSI VUT Brno [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/MAE/zterm.php>
- [11] SCHREIER, J. Vliv parametrů vazebného média a struktury povrchu na kvalitu snímaného signálu akustické emise: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, 2012, 60 s. Vedoucí práce: Mazal, P.

- [12] ILYINYKH, O. Kategorizace signálu akustické emise při cyklickém zatěžování dílců: bakalářská práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra technologie obrábění, 2013, 30 s. Vedoucí práce: Vašata, J.
- [13] HORA, P. Lokalizace zdrojů akustické emise. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, Institut technologie a spolehlivosti, 1994, 70 s.
- [14] NDT: Introduction to Acoustic Emission Testing [online] .Dostupné z :http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Index.htm
- [15] <http://popular.fbmi.cvut.cz/biomedicina/PublishinImages/UZV/ultrazvukova-sonda.png>
- [16] http://www.vallen.de/fileadmin/_processed_/csm_VS150-M_300dpi_800x650px_c18d55460a.png
- [17] http://www.vallen.de/fileadmin/_processed_/csm_AEP5_AEP5H_webpage_2b64d7f29c.png
- [18] <https://www.digitalwavecorp.com/product-page/b-454-mae-transducer>

Seznam obrázků

- 1. Obr. 2.1 Princip AE
- 2. Obr. 2.2 Pen test
- 3. Obr. 2.3 Nespojitá a spojitá emise
- 4. Obr. 2.4 Podélné a příčné vlny
- 5. Obr. 2.5 Rayleighovy a Lambovy vlny
- 6. Obr. 2.6 Kaiserův jev
- 7. Obr. 2.7 Fellicity jev
- 8. Obr. 2.8 AE v prodlevách zatížení
- 9. Obr. 2.9 Energie událostí
- 10. Obr. 2.10 Parametry signálu AE
- 11. Obr. 2.11 Lineární lokalizace
- 12. Obr. 2.12 Planární lokalizace
- 13. Obr. 2.13.1 Schéma piezoelektrického snímače
- 14. Obr. 2.13.2 Schéma přenosové trasy signálu AE
- 15. Obr. 4.1 Rozmístění senzorů a zdroje
- 16. Obr. 4.2 Schéma lokalizačního algoritmu

17. Obr. 4.3 Zdrojový kód lokalizačního algoritmu
18. Obr. 4.4 Zobrazení závislosti amplitudy na vzdálenosti
19. Obr. 5.1 Snímač Vallen systeme VS150-M
20. Obr. 5.2 Předzesilovač Vallen systeme AEP5
21. Obr. 5.3 Budič Digital wave B454
22. Obr. 5.4 Sestava snímačů
23. Obr. 5.5 Měřicí sestava
24. Obr. 5.6 Měření rychlosti
25. Obr. 5.7 Zachycený signál prvním a druhým snímačem
26. Obr. 5.8 Ukázka měření

Seznam tabulek

1. Tab. 2.1 Vliv parametrů na velikost amplitudy
2. Tab. 2.13.1 Tabulka složitosti vyhodnocení signálu AE
3. Tab. 5.1 Skutečné a vypočítané souřadnice zdroje
4. Tab. 5.2 Naměřené a vypočítané amplitudy
5. Tab. 5.3 Porovnání výsledků